

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta strojní

Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie



DIPLOMOVÁ PRÁCE

ČIŠTĚNÍ PVD POVLAKŮ LASEREM

Laser cleaning of PVD coatings

Autor práce:

Bc. Hana Šrejmová

Studijní program:

NVI Výrobní inženýrství

Vedoucí práce:

Ing. Pavel Novák, Ph.D.

PRAHA, 2022

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Šrejmová** Jméno: **Hana** Osobní číslo: **473588**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávající katedra/ústav: **Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie**
Studijní program: **Výrobní inženýrství**
Specializace: **Bez specializace**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Čištění PVD povlaků laserem

Název diplomové práce anglicky:

Laser cleaning of PVD coatings

Pokyny pro vypracování:

1. Druhy laserů
2. Návrh experimentu
3. Vyhodnocení experimentu
4. Ekonomické zhodnocení

Seznam doporučené literatury:

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

Ing. Pavel Novák, Ph.D. ústav technologie obrábění, projektování a metrologie FS

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

Datum zadání diplomové práce: **15.03.2022**

Termín odevzdání diplomové práce: **18.08.2022**

Platnost zadání diplomové práce: _____

Ing. Pavel Novák, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

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

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

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem celou práci vypracovala samostatně, že jsem uvedla všechny literární zdroje, ze kterých jsem čerpala a řádně je citovala.

V Praze dne

.....

Bc. Hana Šrejmová

Poděkování

Tímto bych ráda poděkovala panu Ing. Pavlu Novákovi, Ph.D. za vedení této diplomové práce. Dále bych chtěla poděkovat paní Ing. Radce Bičíškové za pomoc a rady při provádění experimentální části diplomové práce.

Děkuji rodině a přátelům za podporu při tvorbě této diplomové práce.

Anotační list

Jméno autora:	Bc. Hana Šrejmová
Český název:	Čištění PVD povlaků laserem
Anglický název:	Laser cleaning of PVD coatings
Akademický rok:	2021/2022
Studijní program:	NVI Výrobní inženýrství
Škola, fakulta:	ČVUT v Praze, Fakulta strojní
Ústav:	12 134 Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie
Vedoucí DP:	Ing. Pavel Novák, Ph.D.
Bibliografické údaje:	Počet stran: 84 Počet obrázků: 53 Počet tabulek: 36 Počet literárních zdrojů: 41
Klíčová slova:	Laser, čištění, čištění laserem, bezpečnost
Keywords:	Laser, cleaning, laser cleaning, safety
Anotace:	Tato diplomová práce se zabývá nalezením vhodných parametrů nastavení laserového zařízení k vyčištění PVD povlaků. K porovnání se využijí lasery IPG, OMRON a PERLA C. Práce popisuje druhy laserů a laserové technologie.
Abstract:	This diploma thesis deals with finding suitable parameters for laser device settings to clean PVD coatings. IPG, OMRON and PERLA C laser will be used for comparison. The thesis describes types of lasers and laser technology.

Obsah

Obsah	6
1 Úvod	10
2 Laser	12
2.1 Princip laseru.....	12
2.2 Konstrukce laseru.....	13
2.3 Vlastnosti laseru	14
2.3.1 Kontinuální a pulsní režimy provozu.....	17
2.4 Druhy laserů	18
2.4.1 Plynový laser.....	19
2.4.2 Pevnolátkové lasery	20
3 Laserové technologie	24
3.1 Laserové vrtání.....	24
3.2 Laserové řezání	26
3.3 Laserové svařování.....	26
3.4 Laserové kalení	27
3.5 3D tisk kovů	28
3.6 Laserové navařování	29
3.7 Laserové čištění.....	29
4 Konvenční metody čištění	30
4.1 Omílání.....	30
4.2 Tryskání.....	31
4.3 Čištění ultrazvukem	33
4.4 Chemické čištění	33
5 Čištění laserem.....	34
5.1 Princip čištění laserem	34
5.1.1 Ablace	34
5.2 Vhodné materiály ke zpracování.....	35
5.3 Použití laseru	35
5.3.1 Příprava povrchu a odmašťování	35
5.3.2 Odstraňování barev a povlaků	36
5.3.3 Čištění průmyslových forem.....	36
5.3.4 Restaurování kamenných památek	36
5.4 Výhody a nevýhody laserového čištění.....	37

6	Bezpečnostní riziko při používání laseru.....	39
6.1	Třídy bezpečnosti	39
6.2	Působení laserového záření na lidský organismus	41
6.3	Ochranné pomůcky	41
7	Experimentální část	43
7.1	Použité zařízení	43
7.2	Vzorky.....	43
7.3	Povlaky.....	43
7.4	Experiment	44
7.5	Shrnutí výsledků experimentu.....	72
8	Ekonomické zhodnocení.....	74
8.1	Náklady	74
9	Závěr	77
10	Literatura.....	79
11	Seznam obrázků.....	82
12	Seznam tabulek.....	84

Seznam použitých symbolů a zkratek

Označení	Legenda – zkratky	
PVD	Fyzikální metoda depozice vrstev	
VBD	Vyměnitelná břitová destička	
ČSN EN	České státní normy	
CE	Evropská shoda	
SEM	Skenovací elektronový mikroskop	
EDS	Energiově disperzní spektrometrie	
PN	Přechod polovodiče typu P a typu N	
CW	Kontinuální režim	
QCW	Kvazi kontinuální režim	
LD	Laserové diody	
RF	Radio frekvenční buzení	
El.	Elektrické buzení	
DC	Stejnoseměrný proud	
YAG	Monokrystal yttrium aluminium granát	
LPSS	Lamp pumped solid state	
DPSS	Diode pumped solid state	
hm.%	Hmotnostní procento	
IPL	Intense Pulsed Light	
Označení	Jednotka	Legenda – symboly
ΔE	[J]	Energetický rozdíl hladin
h	[J · s]	Planckova konstanta

ν	[Hz]	Frekvence vyzářeného fotonu
λ	[nm]	Vlnová délka
w_0	[mm]	Poloměr pasu svazku
Θ	[mrad]	Polovina divergence (rozbíhavost) svazku
M^2	[-]	Faktor kvality svazku
BPP	[mm.mrad]	Beam Parameter Product
R_a	[μm]	Střední aritmetická hodnota drsnosti profilu
R_{a_x}	[μm]	Střední aritmetická hodnota drsnosti profilu ve směru x
R_{a_y}	[μm]	Střední aritmetická hodnota drsnosti profilu ve směru y

1 Úvod

Čistý a kvalitně připravený povrch nástroje je důležitý z několika hledisek. Při nedostatečné předúpravě povrchu dochází kvůli přítomnosti nečistot ke špatné přilnavosti vrstvy povlaku a zhoršení či ztrátě protikorozi ochrany. Právě kvalita očištěného povrchu zaručuje korozivzdornost, otěruvzdornost a delší životnost naneseného povlaku.

Přebušování řezných nástrojů umožňuje jejich opětovné používání. To zajistí účinnost a trvanlivost ostří, které se blíží novému nástroji a zaručí spolehlivost výrobního procesu. Opakované použití sníží náklady na nástroje a výrobu. Další možností k opětovnému použití nástrojů je nové povlakování nástroje. To umožňuje vyčištění či odstranění původní vrstvy povlaku a zároveň připravení základního materiálu pro nové povlakování. S tímto přístupem je možné prodloužit životnost nástroje několikanásobně.

Metody čištění se dělí na chemické a mechanické. Používají se k odstraňování nežádoucích prvků na povrchu materiálu jako je koroze, okuje, nečistoty, mastnota, oleje, nebo samotný povlak. Rozdíl v metodách spočívá v technologii odstraňování těchto prvků. Mezi mechanické čištění se řadí tryskání, broušení, čištění ultrazvukem apod. U chemického čištění se používají chemické látky a procesy podle požadavku na výsledný stav povrchu materiálu.

Další metodou čištění, je čištění laserem. Díky správně fokusovanému svazku je možné rychle odpařovat nechtěné oxidy, nátěry i povlaky. Díky absenci poškození základního materiálu je možné nahradit chemické i mechanické čištění různých nečistot právě laserem. Laserové čištění se v průmyslu stává standardem pro přesné odstranění nečistot či vrstev bez poškození základního materiálu.

Lasery se dělí na kontinuální a pulsní. Pro laserové čištění se využívají pulsní lasery, které nabízejí velmi krátké a vysoce výkonné pulsy. Pulsní lasery se využívají i pro jiné technologie, např. pro svařování, vrtání, značení a pro práci s mikromateriály. Vysoký výkon pulsního zdroje laseru a krátké pulsy vedou k nízkému teplotnímu ovlivnění v místě dopadu paprsku a nedochází k poškození základního povrchu. Čisticí laser se využívá k čištění organických i anorganických nečistot z povrchu kovu, k odstraňování koroze, kovových částic, barvy, oleje a dalších nečistot.

Cílem této diplomové práce je zjistit vhodné nastavení parametrů laseru, při kterých se odstraní vrstva povlaku z vyměnitelných břitových destiček (VBD) a zároveň se co nejméně ovlivní základní materiál destiček.

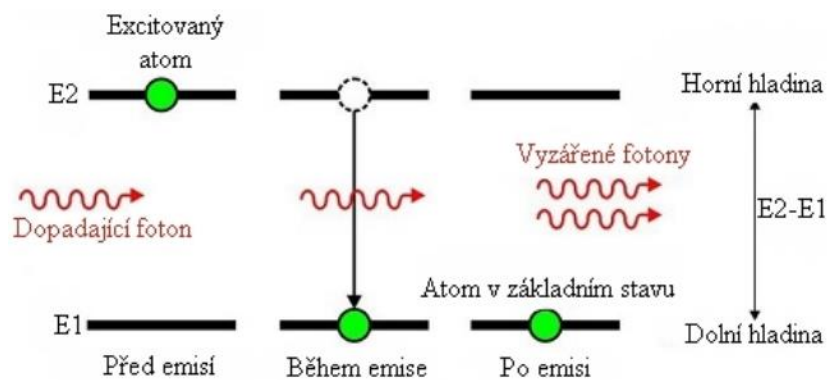
2 Laser

Laser je zkratka počátečních písmen anglických slov, které popisují jeho funkci: Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation. V překladu to znamená zesílení světla stimulovaného emisí záření. V obecném pojetí jde o optický zdroj, který generuje elektromagnetické záření, které se vyznačuje koherentností a monochromaticností. [1] [2]

2.1 Princip laseru

Laserové zařízení přetváří dodávanou energii na elektromagnetické vlnění, které se označuje jako laserový paprsek. Od ostatních druhů záření se paprsek liší svou jednobarevností, uspořádaností a malou rozbíhavostí. Základem každého laserového zařízení je přítomnost aktivního prostředí, ve kterém se trvale nachází element schopný udržet se v základním stavu s nižší energií, nebo v tzv. excitovaném (vybuzeném) stavu s vyšší energií. Během přechodu z vyššího do nižšího energetického stavu element vyzáří foton (kvantum elektromagnetického záření). Při splnění zmíněné podmínky a vzájemné interakci se světlem mohou nastat tři děje:

- Absorpce světla: při tomto ději elementy či atomy přecházejí na vyšší energetickou hladinu díky pohlcení dopadajících fotonů.
- Spontánní emise: děj, který probíhá samovolně a vzniká kvůli zachování termodynamické rovnováhy. Tzn. že atom bez vnějšího podnětu přechází z vyššího energetického stavu do nižšího energetického stavu. Během přechodu se vyzáří foton.
- Stimulovaná emise (Obrázek 1):



Obrázek 1: Princip vzniku stimulované emise [1]

tento děj je hlavní pro funkci laseru, kdy se předpokládá přechod atomu z energeticky vyšší hladiny na nižší hladinu. Foton, který dopadá na excitovaný atom, vyvolá lavinový efekt. Primární foton nezaniká a pokračuje současně se vzniklým fotonem se stejnou fází, rychlostí i frekvencí. Následkem je vznik koherentního záření. [1] [3]

Rozdíl mezi energetickými hladinami je dán vztahem

$$\Delta E = h \cdot \nu, \quad (1)$$

kde:

ΔE – energetický rozdíl hladin [J]

h – Planckova konstanta - $6,625 \times 10^{-34}$ [J · s]

ν – frekvence vyzářeného fotonu [Hz]

Aby mohlo dojít ke stimulované emisi je nutné dodat do systému energii v podobě laserového buzení. Po dané době působení budicího systému se většina atomů aktivního prostředí dostane na energeticky vyšší hladinu. [1]

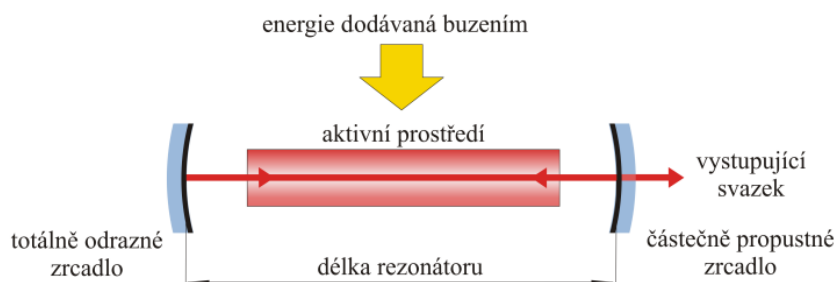
2.2 Konstrukce laseru

Aktivní prostředí je jedním ze základních součástí laserového systému, ve kterém dochází ke stimulované emisi. Další potřebné součásti jsou čerpací zařízení, optický rezonátor, vedení svazku, chlazení, manipulační zařízení a řídicí počítač. [11]

Čerpací neboli budicí systém má za úkol dodávat energii aktivnímu prostředí a zajišťovat nadbytek částic ve vyšší energetické hladině. Takto je zaručena inverzní populace, která je potřebná pro stimulovanou emisi. [11]

Optický rezonátor obstarává vyšší počet stimulovaných přechodů na místo spontánních. Rezonátor tvoří dvě zrcadla, mezi kterými je umístěno aktivní prostředí. Vystupující záření z aktivního prostředí se odrazí od zrcadla a vstupuje zpátky do aktivního prostředí, kde je podnětem pro začátek další stimulované emise. Těmito opakovanými odrazy se zesiluje laserové záření na danou intenzitu, aby svazek mohl opustit rezonátor částečně propustným zrcadlem. Vystupující svazek z rezonátoru může být měněn systémem

čoček a clon, který zlepšuje kvalitu a upravuje průměr svazku. Schéma konstrukce laseru zobrazuje Obrázek 2. [3] [11]



Obrázek 2: Schéma optického rezonátoru [11]

Do pracovní hlavy laseru, případně do optického vlákna se upravovaný svazek dostává soustavou zrcadel a čoček, která zajišťuje, že se svazek dostane k danému místu. Optické součásti jsou vyrobeny z takového materiálu, který nepohlcuje záření generované o určité vlnové délce. Nejčastěji se vyrábí z dielektrického skla nebo leštěných kovů. [11]

Každý výkonový laser musí být vybavený chladicím zařízením, které může regulovat vzniklé teplo vyvolané buzením energetickými ztrátami aktivního prostředí a ohřevem částí laseru způsobený ztrátami v rezonátoru a v optických prvcích, jimiž svazek prochází. Obvykle se ke chlazení využívá proudění kapaliny, většinou demineralizované vody. Vysoká teplota nejvíce ovlivňuje lasery s aktivním prostředím tvořeným krystalem, který vlivem teploty mění své rozměry a vlastnosti. [3] [11]

Jednou z nejdůležitějších součástí laserového systému je řídicí počítač, který je většinou už součástí opláštěného systému. Software slouží pro ovládání otvírání a zavírání laserové závěrky, nastavení různých parametrů laseru, kontrolu a ovládání jednoduchých pohybů laseru. [11]

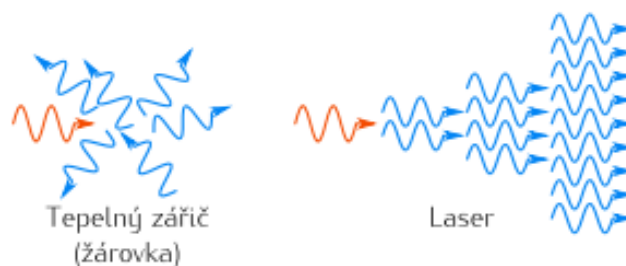
2.3 Vlastnosti laseru

Monochromaticnost: laser je zdrojem jedinečných vlastností. Při stimulované emisi mají všechny emitované fotony stejnou vlnovou délku i energii. U záření definuje barvu vlnová délka, tzn. že laserové záření je monochromatické. [11]

Koherence: kromě stejné vlnové délky jsou fotony ve stejné fázi a postupují stejným směrem, tomu se říká koherence záření. Laser vydává jednu dlouhou spojitou intenzivní

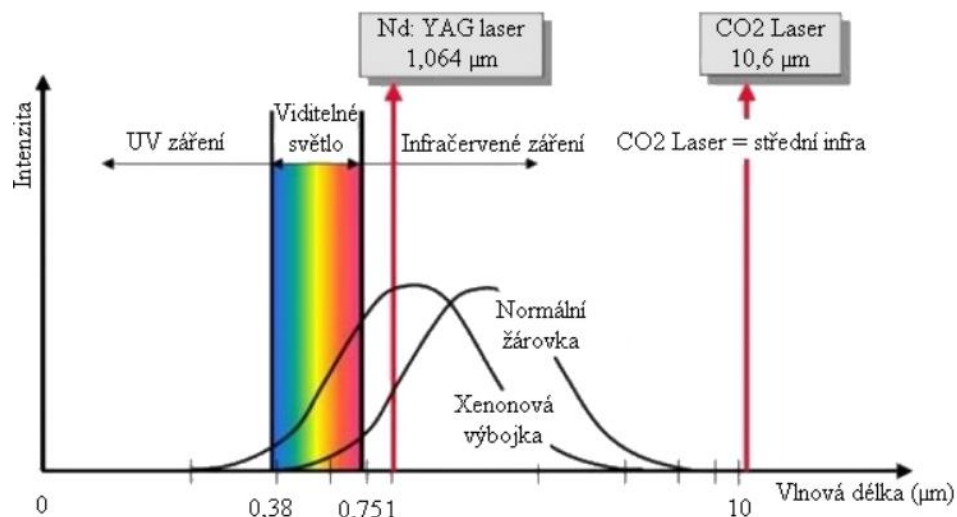
vlnu, to umožňuje použít laser na základě optické interference. Značná koherence a minimální rozbíhavost laserového svazku dává možnost svazek fokusovat (soustředit) na velmi malý průměr. V porovnání s emisí záření tepelného zdroje (žárovka, výbojky apod.) dosahuje laserové záření vysoké hustoty výkonu. [4] [11]

Kolimace: Obrázek 3 kromě porovnání emise záření tepelného zdroje a laseru ukazuje, jak vypadá koherence a kolimace. Kolimace neboli směrnost a intenzita, je největším rozdílem mezi běžným a laserovým zdrojem záření. Laserový paprsek se šíří jen jedním směrem a intenzitu určuje množství světla vycházejícího ze zdroje na jednotku plochy. Dokonalý laserový zdroj funguje jako bodový zdroj o velké intenzitě záření. [11]



Obrázek 3: Srovnání emise záření běžného tepelného zdroje a laseru [11]

Vlnová délka (Obrázek 4): definuje se jako vzdálenost dvou nejbližších bodů, které kmitají při vlnění ve fázi. Ovlivněna vlnovou délkou je nejen oblast spektra, ve kterém se paprsek pohybuje, ale i velikost stopy laseru a jeho absorpce. [4]

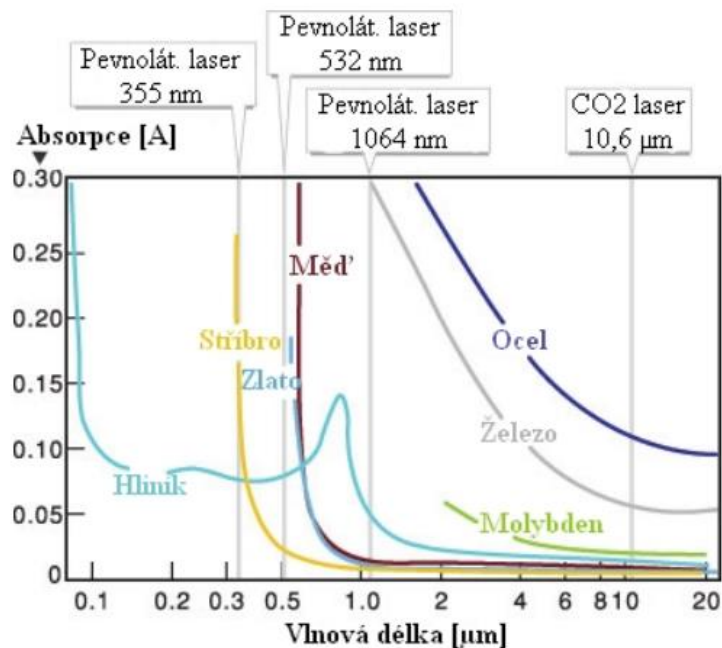


Obrázek 4: Světelné spektrum [4]

Absorpce: z hlediska účinnosti laserových zařízení jde o nejdůležitější vlastnost, která je nejvíce ovlivněna zpracovávaným materiálem a laserovým paprskem. Menší, ne však zanedbatelný, jsou vlivy drsnosti povrchu materiálu, teploty zpracovávaného materiálu, úhlu dopadu paprsku a vlnové délky paprsku. [4]

Délka pulsu: každý puls má danou dobu trvání. Nanosekundové lasery mají rozsah délky pulsu 10 – 250 ns. S větším rozsahem se zvyšují možnosti využití. Pokud ale plazmová frekvence převyší frekvenci záření, dojde kvůli vysoké hustotě elektronů a iontů v plazmatu k odstínění. Délka pulsu má rozdílné reakce u různých materiálu. U gravírování ovlivňuje jemnost a kontrast konečného značení. Femtosekundový puls se využívá při ablaci materiálu. [5]

Obrázek 5 zobrazuje závislost absorpce na vlnové délce, kdy téměř všechny materiály mají snižující se charakter absorpce se zvětšující se vlnovou délkou. Výjimkou je hliník, který je příkladem, že je důležité vybírat druh laseru podle konkrétní aplikace. Pevnolátkový laser dosahuje lepších výsledků než CO₂ laser. [4]



Obrázek 5: Závislost absorpce na vlnové délce [4]

Při volbě laseru pro určitou aplikaci je důležitý parametr kvalita jeho svazku. Právě kvalita laserového svazku mu dává schopnost fokusovat. Kruhově symetrické svazky kvalitativně definuje veličina Beam Parameter Product BPP, která se vyjádří

$$BPP = w_0 \Theta, \quad (2)$$

kde w_0 je poloměr pasu svazku a Θ polovina divergence (rozbíhavost) svazku. Divergence svazku je úměrná jeho vlnové délce λ

$$\Theta = M^2 \frac{\lambda}{\pi w_0}, \quad (3)$$

kde M^2 je faktor kvality svazku. Pro Gaussovské svazky $M^2 = 1$, pro ostatní platí $M^2 > 1$. Kvalitu svazku M^2 vyjadřuje jako poměr BPP tohoto svazku a BPP Gaussovského svazku stejné vlnové délky. To vyjadřuje rovnice:

$$M = \frac{BPP}{\frac{\lambda}{\pi}} = \frac{\pi}{\lambda} BPP \text{ nebo } BPP = \frac{\lambda}{\pi} M^2. \quad (4)$$

Se zvyšující se vlnovou délkou λ je těžké fokusovat svazek, BPP získává vyšší hodnoty a tím se zhoršuje kvalita svazku. [11]

2.3.1 Kontinuální a pulsní režimy provozu

Laser pracuje ve dvou režimech, buď v kontinuálním nebo pulsním režimu. Záleží, jestli je výstupní výkon nepřetržitý v průběhu času nebo má jeho výstup podobu pulsů paprsku.

Kontinuální provoz

Určité aplikace laserových zařízení jsou závislé na paprsku, který má výstupní výkon v průběhu času kontinuální. Tomuto laseru se říká laser s kontinuální vlnou. Aby se vyhovělo takovým aplikacím, vyrábí se několik typů laserů s režimem kontinuální vlny. Reálně hodně těchto laserů svítí v několika podélných režimech současně, úder mezi lehce rozdílnými optickými frekvencemi těchto oscilací reálně způsobí změny amplitudy na časových měřítcích kratších, než je doba oběhu (převrácená frekvence vzdálenosti mezi režimy), zpravidla několik nanosekund nebo méně. Těmto laserům se stále říká kontinuální, protože jejich výstupní výkon je stálý. Když se zprůměruje za libovolné delší časové období, kolísání vysokofrekvenčního výkonu má velmi malý nebo žádný vliv na konečnou aplikaci. [6]

Ke správnému provozu s kontinuálními vlnami je nutné zajistit neustálé doplňování inverze populace zesilovacího média stabilní energií. Pro některá laserová média je nemožné splnit tuto podmínku a některá se nadprodukcí vysokého tepla zničí. [6]

Pulsní provoz

Za pulsní laser se považuje každý laser, jehož optická síla se projevuje v pulsech s danou dobou trvání a danou opakovací frekvencí. Některým laserům se tak říká kvůli jejich neschopnosti udržet provoz v kontinuálním režimu. [6]

Energie pulsu je rovna průměrnému výkonu dělenému opakovací frekvencí. K dosažení maximální energie pulsu se sníží frekvence pulsu, aby se mezi jednotlivými pulsy shromáždilo více energie. Tohoto využívají některé aplikace. Příkladem je laserová ablace, kdy se malý objem materiálu odpaří z povrchu zahřátím po velmi krátkou dobu. Při postupném dodávání energie hrozí absorbování tepla větší částí obrobku a nedojde k potřebnému ohřátí na vysokou teplotu v daném bodě. Některé lasery dokáží generovat pulsy krátké jen několik femtosekund. [6]

2.4 Druhy laserů

Pro průmyslové aplikace se v dnešní době používá pět druhů laserů: Nd: YAG, CO₂, diskové, vláknové a diodové lasery. Tabulka 1 zobrazuje jednotlivé typy, které se dělí podle typu buzení, provozního režimu a dalších parametrů. Každý typ se používá pro různé aplikace, má výhody i nevýhody.

Tabulka 1: Základní přehled průmyslových laserů [7]

Laser	Vlnová délka [nm]	Buzení	Efek. ^a [%]	Režim ^b	Výkon / Energie	Typické aplikace ^c	Údržba	Život. [h]
Nd:YAG	1064	LD	~7	CW	až 6kW	Ř,S	ano	~10 000
				pulsní*	~ mJ/ns (~100W)	Z,G		
		lampy	~3	pulsní*	~ J/ms (~600W)	S,V		~1000
CO ₂	10 600	RF	~10	CW / pulsní	10-250W	Z,G, Ř nk.	ano	~20 000
					až 5kW (Slab)	Ř,S		
		El.	~25		až 20kW (průtočné)	Ř,S		--
Diskový	1070	LD	~15	CW	až 16 kW	Ř,S	ano	~10 000
Vláknový	1070	LD	~30	CW	až 80 kW	Ř,S	ne	~100 000
				QCW	~ J/ms (~1,2kW)	Z,G,M		
				pulsní	~ mJ/ns (~100W)	Z,G,M		
Diodový	808-980	El.	~60	CW	až 10kW	S,K,N	ne	~15 000

^a Efektivita (účinnost) přeměny elektrické energie na světelnou (optickou)

^b U pulsních laserů se udává energie v pulsu a doba pulsu, případně střední výkon (v závorce).

CW – kontinuální, QCW – kvazi kontinuální.

^c Ř – řezání, S – svařování, Z – značení, G – gravírování, K – kalení, N – nanášení vrstev, M – mikro-oblábní, nk – nekovů.

Buzení: LD – laserové diody, RF – radio frekvenčně, El. – elektricky (výboj, proud).

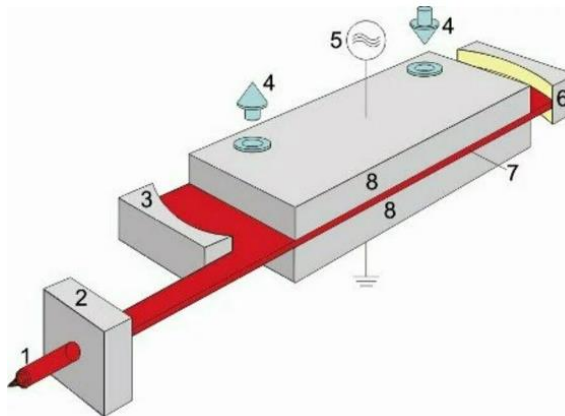
2.4.1 Plynový laser

Prostředí plynového laseru je aktivní, kde směs plynů obsahuje primárně oxid uhličitý (CO₂). Jedná se o bezbarvý plyn bez chuti a zápachu.

CO₂ laser se pro průmysl používá buzený radioaktivně (RF) nebo elektrickým výbojem (DC – direct current). Aktivní prostředí je směs plynů, které se skládá z 5 % oxidu uhličitého (CO₂), 15 % dusíku (N₂) a 80 % hélia (He). Laser obsahuje rezonátor, který se podle uzavřenosti dělí na tzv. sealed off lasery s hermeticky uzavřeným rezonátorem a na tzv. průtočné lasery, u kterých plyn rezonátorem neustále proudí (podmínka u vysokovýkonných laserů ~10 kW). [7] [8]

Lasery DC RF CO₂ se nejčastěji používají do výkonu 5 kW, jsou difúzně chlazené a RF buzené. Obrázek 6 zobrazuje princip laseru. Aktivní plyn se budí radiofrekvenčním

vlněním, to probíhá mezi dvěma elektrodami. Elektrody také zajišťují díky své velké ploše difúzní chlazení plynu. CO₂ lasery mají vysokou spolehlivost, dlouhou životnost a nízké provozní náklady.[7] [8]



Obrázek 6: RF DC CO₂ laser: 1 – výstupní svazek, 2 – tvarovač svazku, 3 – výstupní zrcadlo, 4 – chlazení, 5 – RF buzení, 6 – zadní zrcadlo, 7 – RF excitační výboj, 8 – velkoplošné elektrody. [8]

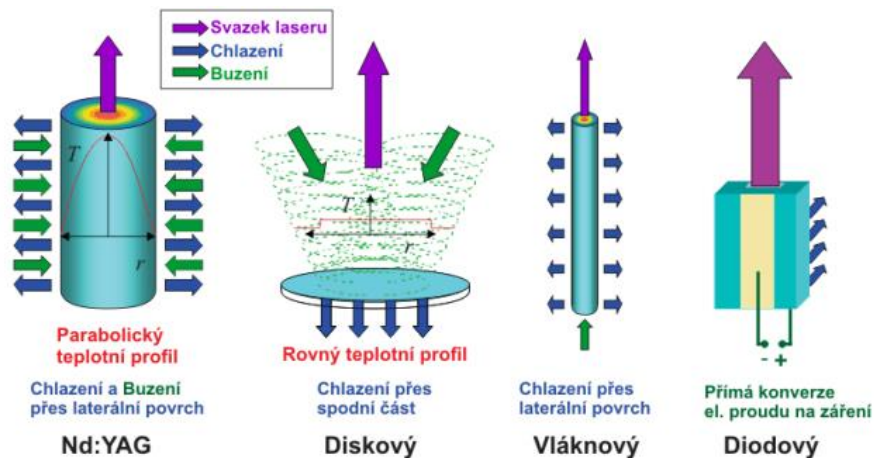
V průmyslu se plynový typ laseru využívá pro řezání nekovů (plasty, kůže, papír, sklo apod.), gravírování a svařování kovů.

Hlavní druhy CO₂ laserů:

- CO₂ laser s pomalým podélným prouděním,
- CO₂ laser s rychlým podélným prouděním,
- CO₂ laser s příčným prouděním,
- Slab laser. [7]

2.4.2 Pevnolátkové lasery

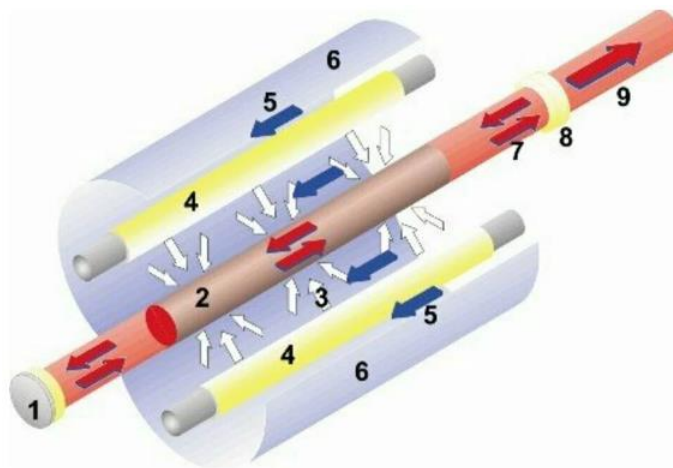
Mezi pevnolátkové lasery patří Nd: YAG, diskový, vláknový a diodový laser. Jejich aktivním prostředím je monokrystal YAG (ytrium aluminium granát) dopovaný ionty neodymu (Nd) nebo yterbia (Yb). Geometrie aktivního prostředí je největším rozdílem každého laseru a je znázorněna na obrázku níže (Obrázek 7). [7] [8]



Obrázek 7: Nd: YAG, diskový, vláknový a diodový laser [8]

Nd: YAG lasery se budí buď výbojkami (LPSS – lamp pumped solid state), nebo laserovými diodami (DPSS – diode pumped solid state).

LPSS Nd: YAG lasery (Obrázek 8) jsou málo účinné při přeměně elektrické energie na světelnou, protože velká část energie výbojky je přeměněna na teplo. V současnosti se aplikují tyto lasery s pulsním provozem pro laserové svařování a vrtání. Tyto aplikace potřebují vysokou energii v pulsu až 100 J/ms. Nízká účinnost je nevýhodou včetně velkých nároků na chlazení, vysoké provozní náklady a krátkou životností výbojek. [7] [8]

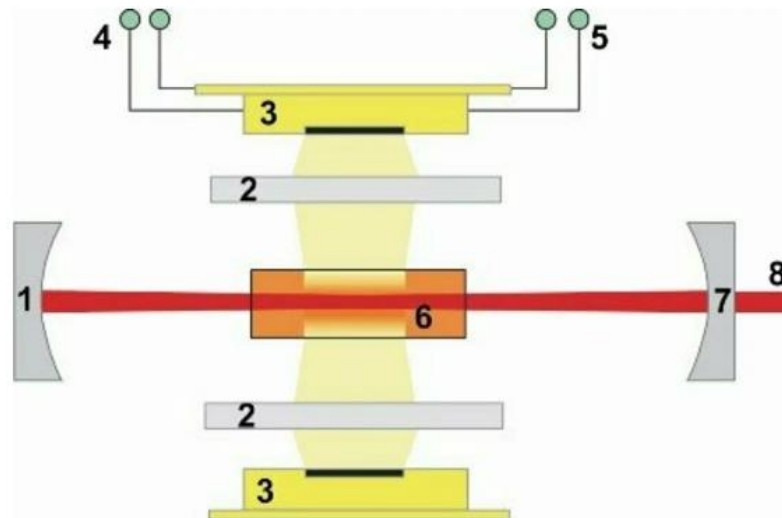


Obrázek 8: LPSS Nd: YAG laser: 1 – zadní zrcadlo, 2 – Nd: YAG krystal, 3 – optické buzení, 4 – výbojka (lampa), 5 – chladicí kapalina, 6 – keramický reflektor, 7 – stimulovaná emise, 8 – výstupní zrcadlo, 9 – svazek laseru [8]

DPSS Nd: YAG lasery (Obrázek 9) disponují vyšší účinností a lepší kvalitou svazku. Dělí se podle dvou hlavních typů buzení podle uspořádání rezonátoru na boční (transversální) buzení a zadní buzení (tzv. end-pumped). Typ zadního buzení z laserových

diod vede do YAG krystalu optickým vláknem, přičemž diody nemusí být součástí rezonátoru, a to je výhoda. Při porovnání obou typů buzení, zadní buzení dosáhne lepší kvality svazku na úkor nižších výkonů, ale boční buzení je schopné dosáhnout vyšších výkonů na úkor nízké kvality svazku. [7] [8]

Generování velmi krátkých pulsů v řádech ns a výkonu do 100 W se využívá pro gravírování kovů, plastů a dalších materiálů. V dnešní době ale používání těchto laserů nahrazuje vláknový pulsní laser se spousty výhodami. [7] [8]

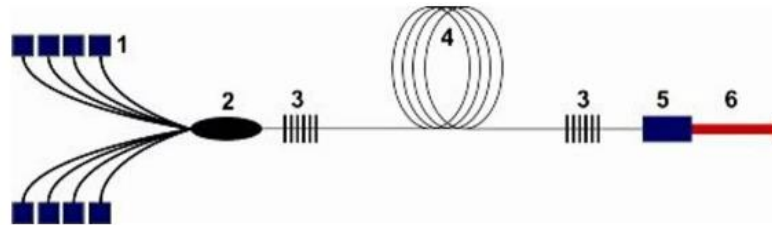


Obrázek 9: Diodami buzený Nd: YAG laser (DPSS): 1 – zadní zrcadlo, 2 – kolimační optika, 3 – pole laserových diod, 4 – chlazení, 5 – napájení, 6 – Nd: YAG krystal, 7 – výstupní zrcadlo, 8 – výstupní svazek [8]

Diskové lasery se řadí mezi moderní technologii, kterou vyvíjí firma Trumpf. Principem se podobá Nd: YAG laseru s rozdílem v aktivním prostředí, který tvoří malý disk. Ten zajišťuje rovnoměrné rozložení teplot, dosahuje vysokých výkonů až 16 kW s dobrou kvalitou výstupního svazku. Díky svému vysokému výkonu se diskové lasery používají pro aplikace svařování a řezání kovů, které jsou náročné na výkon. Nevýhodou oproti vláknovým laserům je nízká životnost a menší účinnost. [7] [8]

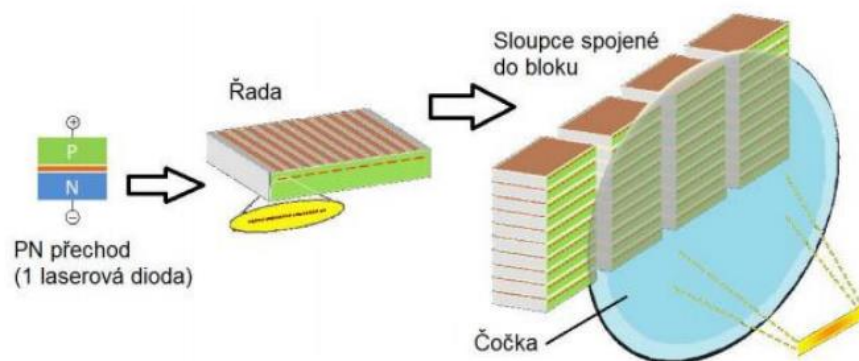
Vláknový laser (Obrázek 10) je technologicky nejmodernější typ pevnolátkového laseru. Je tvořen dlouhým optickým vláknem, které je dopované ytterbiem. Laserové diody přenášejí buzení přes optickou spojku do aktivního vlákna. Místo zrcadel jsou zde Braggovy mřížky, které jsou přímo strukturou na optickém vlákně. Pomocí optického kolimátoru je záření „vyvázáno“ z vláken. Výhodou laseru je jednoduchost, robustnost, vysoká účinnost,

vysoká životnost, malé nároky na prostor a údržbu, vysoká kvalita laserového svazku a nejnižší provozní náklady ze všech uvedených typů. [7] [8]



Obrázek 10: Vláknový laser: 1 – budící diody, 2 – optická spojka, 3 – Braggova mřížka, 4 – optické vlákno, 5 – výstupní kolimátor, 6 – svazek laseru [8]

Diodový (polovodičový) laser generuje záření v PN přechodu průchodem elektrického proudu (Obrázek 11). Při poskládání řad PN přechodů na sebe do sloupců vznikne výkon až 600 W a dalším spojováním jednotlivých sloupců se dosáhne výkonu v řádech kW. Výhodou je vysoká účinnost a nevýhodou velmi nízká kvalita laserového svazku kvůli velké rozbíhavosti. [8]



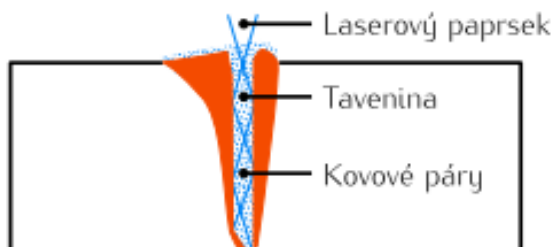
Obrázek 11: Schéma diodového laseru [8]

3 Laserové technologie

Laserové technologie nabízejí rozsáhlé použití pro dělení, odebírání i spojování materiálu a úpravu povrchu materiálu. Technologie se liší podle použitého výkonu, délky pulsu nebo interakce s materiálem.

3.1 Laserové vrtání

Poprvé se technologie vrtání laserem použila v roce 1965 pro přípravu děr v diamantových průvlacích pro tažení drátů. Vrtání laserem je založeno na odpařování materiálu krátkými impulsy laserového svazku o vysoké hustotě výkonu. K částečnému odpaření materiálu dochází při dopadu fokusovaného svazku na materiál a lokálnímu ohřevu na teplotu varu. Nedochozí k fyzickému kontaktu s materiálem, žádným vibracím a nevzniká tříska. Ve vzniklé dutině, která je znázorněna na obrázku (Obrázek 12) dochází k mnohonásobným odrazům záření, tím roste absorpce a otvor se prohlubuje. Hloubku vrtání určuje dodaná energie impulsu, tzn. čím větší energie impulsu, tím více se materiál tavi a odpařuje. Roztavený materiál se odstraňuje z otvoru ven vysokým tlakem par, které vznikají jako následek odpařování při prudkém zvětšení objemu materiálu ve vrtaném otvoru. [9] [11]

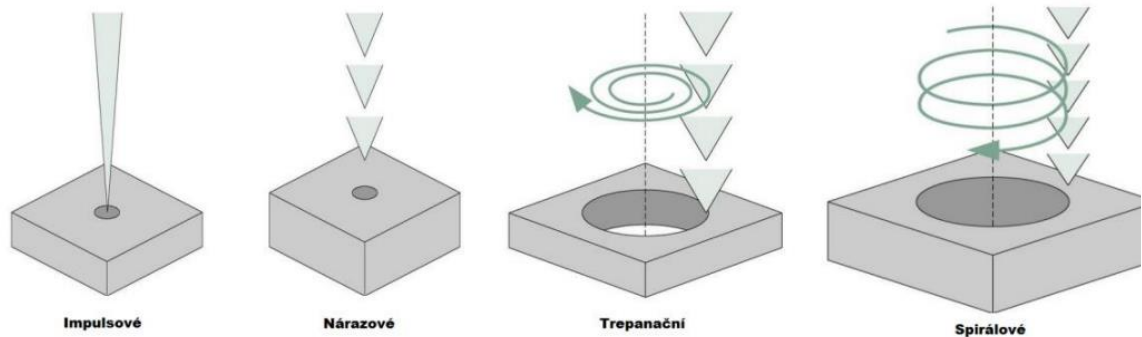


Obrázek 12: Schéma laserového vrtání [11]

Pro vrtání se volí zejména pulsní laser. Zpravidla se využívá opakování řady pulsů v definovaných sériích. Touto technologií se dá dosáhnout velmi malých otvorů (<10 μm) s vysokou přesností na mikrometry. Laserové vrtání je možné uplatnit u různých materiálech, jako kov, dřevo, kámen, sklo, plasty a další druhy materiálů. Díky bezkontaktnímu vrtání je metoda bezprašná a ekologická bez potřeby použití řezných kapalin. Laserové vrtání lze rozdělit do čtyř režimů páce (Obrázek 13):

- impulsové,

- nárazové,
- trepanační,
- spirálové. [9] [10] [11]



Obrázek 13: Režimy vrtání laserem [9]

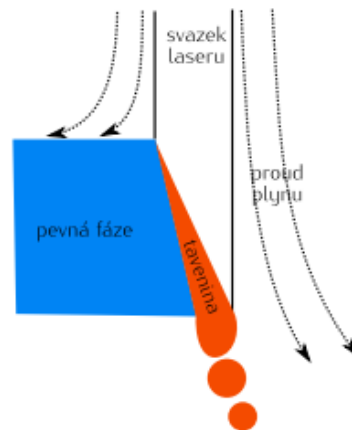
Vrtání jednotlivými impulsy vytvoří hned několik otvorů za sebou. Zatímco při nárazovém vrtání otvor vzniká více impulsy s menším časem trvání a menší energií impulsu. Nárazové vrtání umožňuje dosáhnout hlubších a přesnějších otvorů s menším průměrem než impulsové vrtání. [9]

U trepanačního vrtání laser vyvrtá otvor ve středu konečného otvoru s použitím nárazových impulsů laseru. Počáteční otvor zvětší kroužením nad obrobek v několika zvětšujících se kruhových drahách a zvětšuje průměr otvoru za použití nárazových impulsů. Roztavený materiál je v tomto případě odváděn pod obrobek. Materiál roztavený při vrtání je z otvoru vytlačen směrem dolů. [9]

Laser v případě spirálového vrtání jezdí nad materiálem už s prvními impulsy v kruhové dráze a na rozdíl od trepanace nevytváří žádný počáteční otvor. Laser prostupuje do hloubky ve tvaru točitého schodiště a zároveň vylézá velké množství materiálu směrem nahoru. V případě že se laser dostane skrz materiál, dodatečnými kruhy rozšíří spodní strany otvoru a začistí okraje. Vytvoří se velmi velký a hluboký otvor s vysokou kvalitou. [9]

3.2 Laserové řezání

Po kontaktu fokusovaného laserového svazku s materiálem se oblast pod svazkem roztaví nebo odpaří a po úplném průniku celým objemem materiálu začíná řezání, které je znázorněné na obrázku níže (Obrázek 14). Řezání dosahuje velmi přesných, hladkých a úzkých řezů bez okují. Kolmost hrany lze dosáhnout i při větších tloušťkách materiálu bez dalších úprav. Hloubku řezu ovlivňuje nastavený výkon laserového zařízení a druh řezaného materiálu. [11]



Obrázek 14: Schéma laserového řezání [11]

Řezání materiálu lze provádět odpařováním nebo tavením. Odpařovací řezání je možné nazvat jako vrtání řady otvorů jeden vedle druhého. Tato metoda se využívá především pro řezání netavitelných materiálů, jako jsou dřevo a některé plasty. V případě řezání kovů je metoda zbytečně energeticky náročná kvůli velmi vysoké hustotě výkonu svazku. Pro kovy je vhodnější použít tavné řezání, které je používáno nejčastěji. Principem je lokální natavení materiálu po dopadu laserového svazku a odstranění taveniny ze vznikající štěrbinou proudem vysokotlakého plynu, který se dodává koaxiálně s laserovým svazkem a má za úkol, kromě odstraňování taveniny, i ochlazování řezaného materiálu. [11]

3.3 Laserové svařování

Aby bylo možné svařovat laserem a rychle lokálně ohřát svařovanou oblast, je zapotřebí svazek s vysokou plošnou hustotou. Celý proces svařování laserem s ohřevem, natavením, spojením a ochlazením součásti probíhá velmi rychle. Tím se dosáhne úzké tepelně ovlivněné oblasti v okolí svaru a malé deformace svaru. Výhodou laserového svařování, oproti jiným technologiím svařování, je vysoká pevnost i rychlost svařování

a bezkontaktní způsob zajistí čistotu svaru. Nedílnou součástí výhod je možnost svařovat materiály s velmi odlišnými teplotami tavení. [11]



Obrázek 15: Techniky svařování laserem [11]

Jednotlivé techniky svařování na obrázku výše (Obrázek 15) lze dosáhnout změnou výkonu laseru a průměru fokusovaného svazku a polohou ohniska vůči materiálu, čímž získáme určitou velikost hustoty výkonu svazku. Techniky se dělí podle poměru dosažené hloubky k šířce svaru na kondukční, penetrační a keyhole svařování. [11]

Následující tabulka (Tabulka 2) porovnává různé svařovací technologie. Svařování elektronovým paprskem se nejvíce podobá svařování laserem, a to dodávanou energií v místě svaru, která zaručí dostatečnou hloubku průvaru s velice malou tepelně ovlivněnou oblastí. I přes srovnatelnou hustotu dodávané energie v případě elektronového paprsku, nekonkuruje žádná ze zmíněných metod laseru ve svařovací rychlosti. [11]

Tabulka 2: Srovnání svařovacích metod [12]

Metoda	Hustota energie [W/cm ²]	Hloubka průvaru [mm]	Šířka/hloubka svaru	Svařovací rychlost [m/min]
Laser	10 ⁷ -10 ⁹	10	0,1-0,5	10
Plamen	10 ³	3	3	0,01
El. oblouk	10 ⁴	4	2	0,5-3
Plazma	10 ⁶	6	1	0,5-5
El. paprsek	10 ⁸	50	0,03	0,5-5

3.4 Laserové kalení

Ke kalení je zapotřebí vysoce výkonné laserové zařízení, které rychle ohřeje kalený materiál nad austenitizační teplotu. Chlazení zajišťuje samoochlazovací efekt, kdy se vnesené teplo odvádí samotným materiálem, z toho důvodu se nevyžaduje chladicí médium. Hloubka prokalení je až 2 mm. Celý proces probíhá za atmosférických podmínek a konečná struktura materiálu závisí na několika parametrech:

- výkon laserového paprsku a jeho režim,
- schopnost absorbovat laserové záření,

- vlastnosti kaleného materiálu a jeho mikrostruktura,
- schopnost ochlazování apod. [13]

Ke kalení jsou vhodné zejména kalitelné uhlíkové oceli, nejvhodnější jsou legované oceli s příměsí chromu, molybdenu, manganu a vanadu. Dále je možné kalit litinové výrobky a tepelně vysoce namáhané součásti. [13]

Nejčastěji se používá diodový laser, jehož výhodou je nastavení laserového svazku geometrii kalené součásti, je tedy možné různé nastavení velikosti kaleného pole. Diodové lasery se charakterizují vysokými výkony a relativně krátkými vlnovými délkami. Z důvodu lepší absorpce energie materiálem jsou diodové lasery hospodárnější a efektivnější. Vláknové lasery s lepší kvalitou svazku se využívají pro speciální aplikace. Další výhodou je snížení až eliminace vzniku trhlin a deformací, vysoká rychlost, reprodukovatelnost a spolehlivost. [13]

3.5 3D tisk kovů

3D tisk kovů metodou Selective Laser Melting probíhá na principu plného natavení kovového prášku. Dosažená výsledná struktura materiálu je srovnatelná se strukturou odlévaného materiálu. Během tisku se nanáší tenká vrstva kovového prášku na podkladovou desku a laser, který se pohybuje po dané dráze, natavuje plochu ve tvaru řezu pro dosažení finálního dílce. V procesu tvorby celého dílce probíhá opakované nanesení nové vrstvy prášku a její natavení. Aby byl finální dílec stabilní v průběhu tisku, buduje se i podpůrný materiál, který se při dokončovacích operacích odstraní. [14]

S tímto postupem tvorby kovových dílů je možné dosáhnout bezmála jakéhokoliv tvaru. Také se získá funkční díl o minimální hmotnosti se splněným požadavkem na pevnost. Využívají se moderní materiály, které jsou lehčí a zároveň těžkoobrobitelné. Díky 3D tisku je potřeba pro tvorbu dílce méně materiálu a vzniká menší množství odpadu než při třískovém obrábění. 3D tisk je v tomto směru ekologičtější. [14]

3.6 Laserové navařování

Základní princip laserového navařování pulsním laserem je ve vybuzení laserového paprsku skrze zábleskovou výbojku pomocí krystalu Nd:YAG o vlnové délce 1064 nm. Aby byl systém odolný vůči tepelným výkyvům a mechanickým vlivům, je uzavřen v robustním krytu. Jedná se o velmi precizní navařování, umožňuje navařování vnitřních hran na těžko přístupných a hluboko ležících místech. Návary se pohybují až v rozměrech desetiny milimetru, čímž se minimalizuje jejich začišťování a další opracování obrobku. [16]

Při vývoji tohoto způsobu navařování byla prioritou bezpečnost obsluhy, příkladem jsou uzavřené lasery Cronitex, které nevyžadují žádné zvýšené nároky na ochranné osobní pomůcky, převážně očí. V takto uzavřených laserech je možné navařovat obrobky do hmotnosti až 350 kg, u otevřené pracovní kabiny lze navařovat i podstatně těžší obrobky. Používá se také ochranný plyn, vzniká tak hladký návar bez pórů. Pomocí nastavitelné optiky pro tvorbu laserového paprsku lze vytvořit plynulý návar na hranách, strmých plochách a koutech bez potřeby nahřátí. Nedochozí k deformacím obrobku ani k nutnosti během práce měnit polohu navařovaného obrobku. [16]

Pokud porovnáme laserové navařování a navařování elektrickým obloukem dle tabulky níže (Tabulka 3) lze jednoznačně říct, že laserové navařování je výhodnější. Při zvolení technologie navařování laserem dochází k menšímu tepelnému ovlivnění oblasti. To zaručuje přesně fokusovaný paprsek o vysoké hustotě energetického výkonu. Nedochozí tedy ke změně struktury a materiálových vlastností základního materiálu. [16]

Tabulka 3: Porovnání technologií navařování [16]

Technologie	Teplota v místě navařování	Ovlivněná oblast
Elektrický oblouk	až 500 °C	cca 15 mm
Laser	cca 36 °C	cca 1,5 mm

3.7 Laserové čištění

Jedním z nejmodernějších způsobů čištění a povrchových úprav se stalo laserové čištění. Zbavuje povrch základního materiálu zbytků povlaků a nečistot. Tento způsob čištění je popsán v kapitole 6.

4 Konvenční metody čištění

Jsou metody běžně používané k čištění povrchu.

4.1 Omílání

Jedná se o technologický proces opracování povrchu součásti, který je založený na relativním třecím pohybu brusných tělísek v procesním médiu s obrobkem. Metoda je velmi produktivní, lze opracovávat větší množství obrobků zároveň. Brusná zrna jsou rozptýlena v pracovní nádobě, obvykle spojena s procesním médiem. Nádoba může být ocelový žlab nebo buben, opatřený polyuretanovou nebo pryžovou vložkou. Ve většině případů konají hlavní pracovní pohyb pomocí pohonu asynchronního nebo vibračního motoru. Procesní médium vyplňuje pracovní nádobu, do které se ponoří součásti, nebo v opačném případě se součásti tímto médiem zasypávají. [15]

Metoda omílání se dá použít pro všechny druhy materiálů (kovy a jejich slitiny, dřevo, drahé kameny, keramika apod.). Omílací zařízení a procesní médium se volí podle druhu materiálu, rozměru, tvarové složitosti a podle požadavků na finální jakost povrchu obrobku. Kromě mechanických procesů jako odstraňování otřepů, zaoblování hran nebo vyhlazování, působí omílání na obrobky i chemickým způsobem. Umožňuje odmašťování, antikorozi ochranu nebo leštění. [15]

Strojní mechanické omílání se dělí na metodu odstředivou, vibrační, či vlečnou. [15]

Odstředivé omílání působí pohybem procesním médiem na volně rozptýlené součásti uvnitř pracovní nádoby za současného rotačního pohybu pracovního bubnu. Rotací bubnu dochází k odstředivým silám a ke společnému pohybu média a součástí po toroidních drahách, a to zajišťuje intenzivní brusný otěr. Tato metoda se volí v případě hrubého opracování většího množství dílů najednou. [15] [14] [17]

V případě vibračního omílání jsou obráběné součásti volně rozptýlené v procesním médiu uvnitř nádoby ve tvaru rotačního bubnu nebo žlabu. Pracovní nádoba se při určité frekvenci kmitů rozkmitá za pomoci integrovaného vibračního zařízení. Součásti a médium se pohybují uvnitř nádoby, díky čemuž dochází na povrchu k vzájemnému brusnému účinku. Použití této metody je vhodné pro větší množství obrobků současně. Nevýhodou metody je malý výkon, který je 10x menší než u odstředivé metody. [15] [14] [17]

Vlečná metoda se využívá pro velmi jemné broušení a leštění. Obráběný materiál je upnut ve speciálním držáku, pomocí kterého se manipuluje se součástí, a nedochází ke vzájemnému kontaktu. Pomocí rotačních držáků se součásti ponoří do procesního média, kde probíhá hlavní pracovní pohyb. Při rotaci držáků s celým karuselem se dosáhne složeného planetového pohybu, který zajišťuje shodné podmínky pro jednotlivé obrobky. V průběhu procesu se generuje velký měrný tlak, který způsobuje abrazivní úbytek materiálu na povrchu součástí. Výslednou kvalitu povrchu ovlivňuje řada parametrů:

- materiál použitého média,
- hloubka ponoření,
- doba a rychlost omílání,
- trajektorie dráhy,
- orientace upínacího držáku v pracovní nádobě. [15] [14] [17] [18]

4.2 Tryskání

Metoda se zakládá na opracování povrchu pomocí proudu jemných částic (zrna nebo abraziva), která pod daným úhlem dopadají na plochu otryskávané součásti. Kinetická energie se dodává abrazivu pomocí stlačeného vzduchu, metacího kola, tlakové vody nebo kombinace tlaku vzduchu a vody. Po kontaktu abraziva s povrchem dochází k odstranění nechtěných prvků, jako jsou korozní okraje, koroze, písek, grafit apod. Použitá zrna pro tryskání se dělí na dva typy, a to ostrá a tupá zrna. [19] [20]

Při použití ostrých zrn dochází k úbytku materiálu odstraňováním částic z povrchu a současně se odstraňují nečistoty, korozní produkty a další nechtěné prvky. Povrch má výslednou drsnost danou druhem a velikostí otryskávaného materiálu. Tupá zrna neslouží k úběru materiálu, ale k očištění na základě otloukání, které způsobí na povrchu malé důlky. [19] [20]

Dosažený výsledek je ovlivněn volbou pracovního média. Pro zpevnění povrchu se využívá médium s vyšší hmotností, které po dopadu na povrch způsobí plastickou deformaci a mění tahové povrchové napětí na tlakové. Používají se:

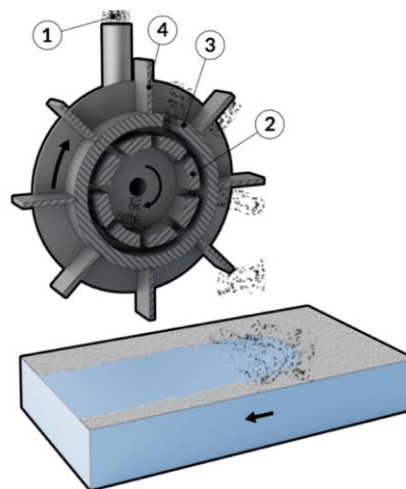
- kalené ocelové kuličky (kuličkování),
- litinové kuličky (brokování),
- sekaný ocelový drát se zaoblenými hranami omíláním (patentování),

- balotínování (skleněné, keramické kuličky apod.). [21]

Pro dosažení čistícího efektu se používají média s nižší hmotností, které nedokážou vyvolat na povrchu plastickou deformaci. K čištění povrchu bez mechanického poškození se využívají abrazivní vlastnosti následujících abraziv:

- směs písku a kapalin,
- suchý led,
- suchý písek,
- jiná abraziva. [21]

Volba použitého abraziva a způsobu tryskání rozděluje metodu na pneumatické tryskání a tryskání pomocí metání abraziva. Pneumatické tryskání dodává kinetickou energii abrazivu tlakem plynného média. Zdrojem stlačeného vzduchu je kompresorové zařízení, které je na vstupu. Tryska, která usměrňuje a urychluje proud abraziva a stlačeného vzduchu, je na výstupu z pneumatického tryskacího zařízení. Výhodou těchto zařízení je snadná mobilita, která dovoluje tryskat těžko přístupná místa a rozměrné konstrukce. V případě tryskání metáním abraziva se kinetická energie získává lopatkami oběžného kola spojeného hřídelí s elektromotorem. Abrazivo je schopno získat rychlost při opuštění lopatky až 75 ms^{-1} . Oběžné okolo má vnitřní a vnější část. Schéma metacího kola znázorňuje obrázek (Obrázek 16). K vnější části jsou připojeny lopatky (4), kdežto na vnitřní části má oběžné kolo otvory (2), které slouží pro usměrnění abraziva (1). To je přidáváno z objímky otvorem umístěným naproti středu oběžného kola. Odstředivá síla vrhá abrazivo otvory v kole na nehybný buben se štěrbinou (3), na vnější rotující kolo s lopatkami. Objímka není spojena s oběžným kolem a nevykonává rotační pohyb. [22]



Obrázek 16: Schéma metacího kola [22]

4.3 Čištění ultrazvukem

Proces čištění pomocí ultrazvuku se dá použít na zařízení např. typu tepelného výměníku. Zařízení je ponořené v lázni, kde mechanickou energii dodává ultrazvuk. Tyto ultrazvukové vlny dokáží odstranit usazeniny z povrchu zařízení. Zařízení je plné kapalného média, ve kterém se šíří ultrazvukové vlny, lámou se a při překročení prahové hodnoty akustického tlaku dochází ke kavitaci. Po implozi nízkotlakových bublin, které se tvoří na rozhraní fází média a povrchu zařízení, se uvolní velké množství energie. Lokální tlakové vlny dosahují hodnot až 100 MPa, čímž dokáží odstranit nánosy na povrchu zařízení a brání dalšímu usazování. [23]

4.4 Chemické čištění

Principem chemického čištění je reakce činidla s nečistotami na povrchu. Tím probíhají fyzikální a chemické změny na povrchu součásti. Čištění se používá například jako předúprava před pokovováním nebo povlakováním, anebo jako konečná úprava povrchu leštěním či barvením. Pro příklad chemické předúpravy před lakováním se používá následující technologický postup:

- odmašťování,
- aktivace,
- fosfátování,
- pasivace. [24] [25]

Před začátkem celého postupu je součást mechanicky ošetřena. Mezi jednotlivými operacemi čištění je důležité součást opláchnout demineralizovanou vodou. Běžná voda po vypaření zanechává na povrchu usazené soli, které negativně ovlivňují finální kvalitu povlaku. [24] [25]

Příkladem chemického čištění jsou moření či odmašťování. Moření odstraňuje z povrchu rez, okuje a jiné oxidické částice. Proces probíhá za působení kyselin, jako je kyselina sírová, solná a fosforečná, nebo louhů. Tato činidla vyvolávají přeměnu nečistot na rozpustné soli, kterých se zbaví oplachem. Odmašťování zbavuje povrch nečistot, které se drží povrchu pomocí například adhezních sil (prach, kovové třísky apod.). Tato metoda uvolňuje nechtěné částice od povrchu do roztoku nebo emulze a zabraňuje jejich opětovnému usazení na součást. [24] [25]

5 Čištění laserem

Existují mechanické a chemické technologie, jak vyčistit povrch součásti, ale po čištění je potřeba ekologická likvidace použitých kapalin a materiálů. Možnou ekologičtější alternativou k těmto technologiím vzhledem k absenci potřebných rozpouštědel nebo jiných činidel je čištěním laserem. Nedochází k poškození základního materiálu a povrch není potřeba dále upravovat. [26]

5.1 Princip čištění laserem

Laserové zařízení produkuje tisíce ultrakrátkých laserových pulsů za sekundu do znečištěného povrchu. Pulsy jsou lineárně seřazeny vedle sebe. Vzniklá energie laseru se absorbuje do povrchové vrstvy a je přeměněna na tepelnou energii. Tepelná energie způsobí odpaření vzniklého znečištění z povrchu a efektivně odstraní všechny nečistoty. Používají se zdroje CO₂, pulsní vláknové nebo Nd:YAG. CO₂ laser funguje na vlnové délce 9,6 μm až 10,6 μm, vláknové a Nd:YAG na vlnové délce 1 060–1 080 nm. [26] [27]

5.1.1 Ablace

Proces laserové ablace je odstraňování materiálu z pevného povrchu jeho ozáření laserovým paprskem. Při použití nízkého laserového toku se materiál ohřeje absorbovanou energií a odpaří se (sublimuje). Při použití vysokého laserového toku se materiál obvykle přemění na plazmu. Běžně se laserová ablace používá na odstraňování materiálu pulsním laserem, ale je i možná ablace laserovým paprskem s kontinuální vlnou, pokud je intenzita laseru patřičně vysoká. Pokud se použijí dlouhé laserové pulsy, mohou ohřívat, tepelně měnit nebo poškozovat základní materiál, naproti tomu použití ultrakrátkých laserových pulsů způsobí minimální poškození materiálu v důsledku ultrakrátké interakce laserového paprsku s povrchem materiálu. [28]

Hloubka absorbování laserové energie, a zároveň množství odstraněného materiálu jedním laserovým pulsem, závisí na optických vlastnostech materiálu, vlnové délce a délce pulsu laseru. Rychlost ablace se dá definovat jako celková hmotnost odebraného materiálu z povrchu součásti na jeden laserový puls. Jako důležitou vlastností laserových pulsů je snadná manipulace a velký rozsah nastavení volitelných parametrů. Díky tomu je laserová ablace velmi cenná jak pro výzkum, tak pro průmyslové aplikace. [28]

Laserová ablace má mnoho aplikací, mimo nejjednoduššího řízeného odstraňování materiálu z povrchu se využívá k obrábění nebo vrtání. Laserem lze vrtat extrémně malé, hluboké díry do velmi tvrdých materiálů. Ultrakrátké laserové pulsy odstraní materiál velmi rychle, takže se absorbuje velmi malé množství tepla materiálem a díky tomu lze vrtat jemné nebo tepelně citlivé materiály. [28]

Výhodou je, že není nutné použít rozpouštědla a aplikace je šetrná k životnímu prostředí, obsluha není vystavena nebezpečí a nehrozí zdravotní problémy. Provozní náklady jsou nižší než u tryskání suchým ledem, naproti tomu počáteční investiční náklady jsou mnohem vyšší. Výhodou je, že proces laserové ablace je šetrnější než abrazivní techniky. Účinně odstraňuje rez ze železných předmětů, odstraní oleje nebo mastnotu z různých povrchů, je možné restaurovat obrazy, sochy nebo fresky. Laserová ablace se také používá pro čištění pryžových forem kvůli minimálnímu poškození povrchu forem. [28]

5.2 Vhodné materiály ke zpracování

Laserové zařízení nabízí mnoho možností nastavení laseru a díky tomu se dá využít schopnost čištění laseru na různé druhy materiálů. Na kovy a barevné kovy, které se využívají k výrobě různorodých dílů, nástrojů či forem ve všech průmyslových odvětvích. K tomu patří i kompozitní materiál a plast, který se v dnešní době využívá všude. Dalšími materiály vhodnými k čištění jsou kámen, v podobě kamenných soch či staveb, skla a dřevo, které se využívá např. k obložení saun nebo k obložení okenních rámu. [29]

5.3 Použití laseru

Lasery s krátkými či ultrakrátkými pulsy umožňují čištění mnoha druhů znečištění. Zaostřený paprsek zbavuje povrch nečistit puls po pulsu.

5.3.1 Příprava povrchu a odmašťování

Před začátkem úprav materiálu pájením, svařováním nebo lakováním je důležitá operace příprava povrchu. Správně očištěný povrch se vyznačuje zvýšenou přilnavostí, barva na něm lépe drží a svary jsou pevnější díky nepřítomnosti nečistot, které mohou narušovat celistvost svaru. Laser dokáže odstranit mastnotu s nečistotami a připravit kontaktní plochy k lepení s dokonalou přilnavostí a pevností. Kromě mastnoty a nečistot laser čistí a odstraní tuky, oleje, zaschlé PUR pěny, inkoust i gumu a pryž. [30]

5.3.2 Odstraňování barev a povlaků

K odstraňování barev se používá pulsní paprsek laseru. Nejsou potřeba žádná abraziva, kapaliny a další chemikálie potřebné při použití konvenčních metod, laserová metoda je tedy šetrná a ekologická, avšak nebezpečná pro obsluhu bez osobních ochranných pracovních pomůcek. Proces odstraňování barev je možné provádět jak kompletně, tak ve specifických oblastech, nebo i ve vrstvách s přesností na mikrometry. Tato schopnost se využívá v mnoha ohledech, při ochraně proti korozi, při preventivní údržbě a pro čištění náročných kompozitních nebo plastových materiálů. [31]

Čištění povlaků rezných nástrojů či břitvých destiček je podobné jejich odstraňování s rozdílem v nastavených parametrech použitého zařízení a paprsku. Používá se pulsní laser s vysokým výkonem a délkou pulsu v nanosekundách až femtosekundách.

5.3.3 Čištění průmyslových forem

Mezi průmyslové formy se řadí lisovací formy, vstřikovací formy, formy na sklo a mimo jiné i formy na pneumatiky. Výhodou čištění forem laserem je především možnost čištění přímo na pracovišti bez potřeby demontáže a přesunu formy. Při splnění podmínek je možné provádět čištění i za provozních teplot formy, tedy po dokončení čištění se minimalizuje ztrátový čas způsobený montáží či demontáží a forma je připravena k opětovnému použití. [32]

K čištění se využívá tisíce laserových pulsů za sekundu k pohlcení a odstranění nečistot z podkladu, a to bez poškození základního materiálu. Při čištění různých typů forem nevzniká odpad, při správném použití je zaručena konstantní kvalita a riziko je minimální nebo žádné. [32]

5.3.4 Restaurování kamenných památek

V posledních letech se pro čištění památek začalo využívat technologie čištění laserem, která dosáhla velmi dobrých výsledků. Čištění se pokládá za podstatný krok při restaurování kamenných památek. Během čištění nastává odstraňování depozit, korozních produktů a dalších nečistot, které poškozují a mění původní vzhled památky. Princip laseru umožňuje selektivní čištění nečistot díky správnému nastavení parametrů. Při testování této metody čištění na několika objektech se prokázalo, že metoda je velmi citlivá díky bezkontaktnímu čištění a dá se používat i na památky s vážně narušenou strukturou nebo na mimořádně hodnotná díla. [33] [34]

5.4 Výhody a nevýhody laserového čištění

Výhody laserového čištění

- úprava špatně přístupných míst jako rohy, díry nebo zakřivené plochy,
- bezkontaktní aplikace,
- čištění i porézních materiálů,
- rychlost zpracování povrchu,
- bezprašnost,
- po procesu není nutné další odmašťování a oplachování,
- možnost bez deformací zpracovat tenké materiály,
- šetrnost k čištěnému materiálu,
- možnost ručního nebo robotického použití,
- šetrnost k životnímu prostředí,
- přesnost a reprodukovatelnost úběru funkčních vrstev s přesností na mikrometry. [35] [36]

Nevýhody laserového čištění

- pořizovací cena,
- nutnost proškolení obsluhy při ručním použití. [35]

Tabulka 4 níže zobrazuje porovnání některých metod čištění s laserovým čištěním.

Tabulka 4: Srovnání metod čištění [36]

	Poškození základního materiálu	Účinnost / spotřeba	Bezpečnost prostředí	Investice
Laserové čištění (bezkontaktní)	Ne	Vysoká / Napájení (jednotky kW), stlačený vzduch	Nutnost odsávání, žádné znečištění	Vysoké vstupní náklady. Velmi nízké provozní náklady
Chemické čištění (kontaktní)	Ano	Nízká / Napájení (desítky kW), chemie	Riziko chemické kontaminace	Vysoké vstupní a provozní náklady. Vysoké náklady na likvidaci použité chemie
Mechanické broušení (abrazivní)	Ano	Nízká / Abraziva, brusné kotouče, brusný kámen	Prašné znečištění	Průměrné vstupní náklady. Vysoké náklady na pracovní sílu
Suchý led (mechanicky a podchlazením)	Ne	Střední / Pelety pevného CO ₂	Žádné znečištění	Průměrné vstupní náklady. Vysoké provozní náklady
Ultrazvuk (kontaktní)	Ne	Střední / Speciální čisticí roztoky	Žádné znečištění	Nízké vstupní náklady. Průměrné provozní náklady

Laserové čištění vyžaduje vysoké vstupní náklady, ale oproti porovnávaným metodám má značně nízké provozní náklady. Další rozhodující aspekt je účinnost metody, kterou má laser nejvyšší. [36]

6 Bezpečnostní riziko při používání laseru

Výstražné štítky jsou velmi důležité, varují zaměstnance i ostatní lidi v blízkém prostoru laserových zařízení před možným nebezpečím. Informuje o riziku vystavení laserového záření. Štítky musí být na viditelném místě, aby zvýšily bezpečnost pracoviště. Obrázek 17 zobrazuje příklady ochranných štítků používané pro vyšší bezpečnost. [38]



Obrázek 17: Ochranné štítky [38]

Rozdělení laserů do tříd podle nebezpečí stanovuje norma ČSN EN 60825-1. Toto rozdělení hodnotí rizika laseru a potenciální nebezpečí laserového zařízení. [38]

6.1 Třídy bezpečnosti

Laserové zařízení třídy 1

Zařízení v této třídě jsou bezpečná při jejich používání za předvídatelných podmínek a neumožňují přístup uživateli k záření. Jedná se o vysoko výkonové lasery v pásmu vlnových délek 500 nm - 1500 nm, výkon zdroje se pohybuje v rozmezí $1,2 \times 10^{-4}$ W až 8×10^{-4} W. Tyto lasery jsou zabezpečené pouzdry a kryty, které nepropouští potenciálně nebezpečné záření. Pokud se otevře kryt, laserové zařízení se vypne. Je možné svazek pozorovat dlouhodobě i s pomocí optických pomůcek, jako je dalekohled či oční lupa. Při pohledu do svazku viditelného záření mohou nastat oslňující optické efekty. [37] [38] [39]

Laserové zařízení třídy 1M

Pro tuto třídu platí stejné podmínky jako pro třídu 1. Avšak hrozí v případě pozorování svazku pomocí optických pomůcek (dalekohled, lupa, mikroskop) poškození oka následkem překročení maximální přípustné dávky ozáření. [38] [39]

Laserové zařízení třídy 2

Laserové zařízení s výkonem zdroje ve viditelném pásmu nepřekročí 1×10^{-3} W. V rozsahu vlnových délek viditelného záření od 400 nm do 700 nm jsou zařízení bezpečná pouze pokud laserové záření zasáhne oko nanejvýš na 0,25 s. Během tohoto chvilkového ozáření dokáže lidské oko zareagovat zavřením víčka či člověk otočí hlavu stranou. Tyto fyziologické reakce zabrání poškození oka, ale chvilkové ozáření může způsobit oslnění, zábleskovou slepotu nebo narušení vidění. [37] [39]

Zařízení jsou označena výstražnými štítky, aby informovaly uživatele o možném poškození očí a nedívali se přímo do svazku, případně aby zareagovali otočením hlavy nebo zavřením očí, a zabránili upřenému pohledu do svazku. [38]

Laserové zařízení třídy 2M

Stejně jako třída 1M, i pro třídu 2M platí stejné podmínky jako u třídy 2. Sledování svazku optickými pomůckami (dalekohled, lupa, mikroskop) způsobí poranění oka. Uživatel je upozorněn pomocí výstražných štítků před poškozením očí. Vedle tohoto označení třída 2M varuje uživatele před použitím optických pomůcek. [38] [39]

Laserové zařízení třídy 3R

Přípustný výkon zdroje laserového zařízení je 6×10^{-4} až 4×10^{-3} W. Riziko poškození roste s délkou trvání ozáření, které může být nebezpečné pro oko a nebezpečnější při záměrném ozáření. Nebezpečné je i pozorování optickými pomůckami (dalekohled, lupa, mikroskop). Proto by se měly zařízení používat výhradně tam, kde je nízké riziko přímého pohledu do svazku. Krátkodobé ozáření ve viditelném vlnovém pásmu záření může způsobit oslnění, zábleskovou slepotu či zrakové vjemy, které způsobí dočasné narušení vidění. Narušení vidění záporně ovlivňuje bezpečnost práce ve výškách, práce na vysokém napětí nebo obsluhu strojů. [37] [38] [39]

Laserové zařízení třídy 3B

Do této třídy patří středně výkonové laserové zařízení s přípustným výkonem zdroje 0,5 W. Lasery třídy 3B jsou při pohledu do svazku běžně nebezpečné i pro krátkodobé ozáření. Nebezpečný je i pohled do svazku odrazeného od zrcadlové plochy. Lasery mohou způsobit lehká poškození kůže nebo vznícení hořlavých látek, pokud je svazek zaostřen a má malý průměr. [37] [38] [39]

Laserové zařízení třídy 4

Do třídy 4 se řadí lasery velkých výkonů, které jsou nebezpečné kvůli ozáření kůže, nebezpečné pro pohled oka do svazku, nebo i pro pohled do rozptýlených odrazů. Uživatel má přístup k laserovému zařízení, které může způsobit i vznik požáru, proto jsou označeny výstražnými štítky. [37] [38] [39]

6.2 Působení laserového záření na lidský organismus

Působení laserového záření obecně poškodí biologické tkáně podle nastavených fyzikálních parametrů zdroje záření, jako je vlnová délka záření, doba trvání impulsu záření, velikost odrazu, intenzita ozařování a dávka ozáření. Důvod poškození biologické tkáně je absorpce záření danou tkání. Vstřebávání tkáně je závislé na vlnové délce absorbovaného záření, tzn. vlnová délka vymezuje tkáň, která je náchylná k poškození laserem. [37]

6.3 Ochranné pomůcky

Součástí ochranných brýlí jsou filtry, které podléhají parametrům laseru dle norem ČSN EN 207/208 a zároveň mají CE certifikát. Ochranné brýle mají mnoho tvarů pro všechny typy laserů, nehrozí tedy obstrukce poškození zraku laserem. [40]



Obrázek 18: Ochranné brýle [40]

IPL ochranné brýle jsou určeny pro práci s intenzivním pulsním laserem. Jsou schopné tlumit intenzitu světla na bezpečnou úroveň a chrání před infračerveným zářením. Výhodou je možnost nosit IPL ochranné brýle s dioptrickými brýlemi. [40]



Obrázek 19: IPL ochranné brýle [40]

Laserová ochranná okna se využívají jako průhledná okna kompletně uzavřeného laserového systému nebo jako průhled v ochranných stěnách a roletách. Skrze ochranná skla

je možné kontrolovat laserový systém nebo manipulovat s laserem, aniž by bylo nutné použít ochranné brýle. K oddělení laserových pracovišť od ostatních se používají ochranné zástěny, stěny a kryty. [40]



Obrázek 20: Laserové okno [40]

Bezpečnostním školením na ochranu zdraví a bezpečným zacházením s lasery si projde každý zaměstnanec, který bude pracovat s laserovými zařízeními třídy 2 a vyšší. Školení je určeno pro obsluhu průmyslových laserů pro řezání, svařování, gravírování, vrtání a obrábění. Je také pro pracovníky spektroskopických laboratoří a výzkumných ústavů. Během školení se obsluha dozví o principu laseru, seznámí se s normou 60825-1, se zdravotními riziky ozáření tkání a očí, kvalifikací tříd laserů, ochrannými pomůckami a zásadami bezpečnosti nebo povinnosti pracovníků a zřizovatele. [40]

7 Experimentální část

Experimentální část popisuje cestu ke zjištění ideálního nastavení laserového zařízení tak, aby došlo k požadovanému odstranění povlaku. Volbou různých nastavení parametrů laserového paprsku použitého na několik PVD povlaků se projeví ideální nastavení parametrů.

7.1 Použité zařízení

K experimentu byly použity lasery OMRON, IPG laser a PERLA C laser. Pro měření složení povrchu byl použitý elektronový skenovací mikroskop TESCAN MIRA (SEM, EDS). Pro měření odebrané vrstvy a drsnosti byl použitý konfokální mikroskop OLYMPUS OLS5000. Tabulka 5 zobrazuje porovnání použitých laserů.

Tabulka 5: Porovnání použitých laserů

Parametry	Lasery		
	IPG laser	OMRON laser	PERLA C laser
Vlnová délka [nm]	1062	1062	1030
Výstupní výkon [W]	200	12	100
Délka pulsu [ns]	100-200	3	1500
Frekvence pulsů [kHz]	1-50	10-1 000	1-50
Max. rychlost [mm.s ⁻¹]	7 000	100	2 000
Velikost spotu [μm]	300	40	30

7.2 Vzorky

Pro experiment byly použity různé druhy VBD. Rozměry vzorku byly Ø20 mm a výška 4,5 mm. Jako základní materiál byla použita nástrojová ocel 19403 a 19308. Tloušťka vrstvy povlaku je 4 - 15 μm.

7.3 Povlaky

- ALWIN – CrAlSiN, jde o nanokompozitní povlak s vysokým obsahem chromu vhodný pro aplikace náročné na odolnost vůči nalepování obráběného materiálu na nástroj.
- TRIPLE COATING Cr – povlak TiN + AlTiN + CrAlSiN, je tvořený adhezí vrstvou TiN, středovou vrstvou AlTiN a vrchní nanokompozitní vrstvou CrAlSiN. Vhodně

kombinuje vynikající houževnatost a tvrdost vrstvy AlTiN a extrémně vysokou tvrdost vrchní nanokompozitní vrstvy.

- CrCN – povlak s abrazivní, korozní a oxidační odolností. Má vynikající vlastnosti pro smyk při omezeném mazání a vysokou tvrdost s velmi dobrou adhezí.
- VANADIN – povlak CrVN se závěrečnou vrstvou s obsahem vanadu tvoří v průběhu užívání nástroje unikátní vysokoteplotní kluznou vrstvu. Tím se potlačí nalepování materiálu, zvýší se životnost nástroje a zvýší se kvalita odlitků. [41]

7.4 Experiment

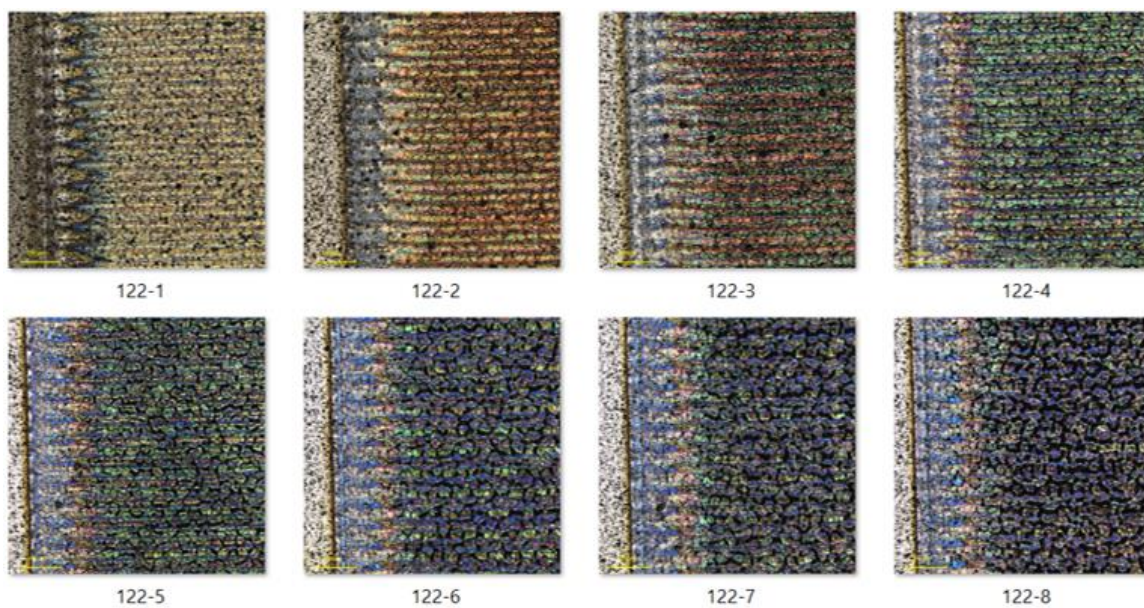
Pro experiment se použilo 12 vzorků při použití 3 druhů laseru. Na každém vzorku bylo vyčištěno určité množství oblastí čtverců s narůstajícím počtem přejezdů. Laserem IPG se vyčistily 4 vzorky, laserem PERLA C 3 vzorky a laserem OMRON se vyčistilo 5 vzorků. Při čištění se měnily parametry laserů, a to výkon, frekvence, rychlost, rozteč šrafování, opakování přejezdů a zaostření paprsku (fokusace).

Vzorek 1

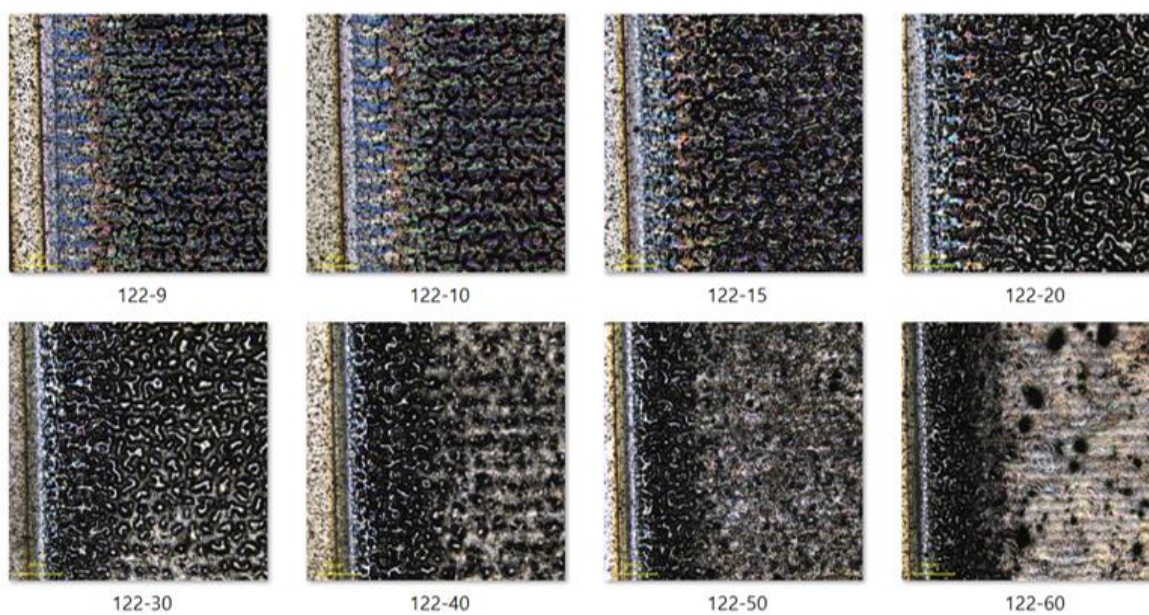
Pro první vzorek byl použit laser IPG o výkonu 50 W, frekvenci 50 kHz, rychlosti $500 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$, rozteči šrafování 0,05 mm a počtem přejezdů 1x - 60x. Jako základní materiál byla použita nástrojová ocel 19403 s povlakem CrCN a pořadovým číslem 122.



Obrázek 21: Vzorek 19403-122; počet přejezdů 1-60x



Obrázek 22: Čištěný povrch, vzorek 19403-122 (mikroskop, přejezd 1x-8x)



Obrázek 23: Čištěný povrch, vzorek 19403-122 (mikroskop, přejezd 9x-60x)

Tabulka 6: Měření hloubky úběru a drsnosti povrchu (vzorek 19403-122)

Počet přejezdů	Odebraná vrstva [μm]	Drsnost Ra původní [μm]	Drsnost Ra po čištění laserem [μm]
1	-	0,232	0,262
2	-	0,157	0,146
3	-	0,366	0,327
4	-	0,095	0,367
5	-	0,240	0,497
6	-	0,135	0,818
7	-	0,203	0,574
8	-	0,133	0,808
9	1,370	0,521	0,866
10	1,834	0,236	1,038
15	3,029	0,201	0,953
20	5,107	0,200	3,977
30	8,388	0,092	0,494
40	11,996	0,341	1,973
50	17,224	0,208	1,383
60	19,780	0,325	0,910

Během čištění povrchu docházelo k přetavení vrstvy. Nejvyššího úběru 19,8 μm bylo dosaženo při 60 přejezdech. Drsnost čištěné plochy laserem byla horší než drsnost původního povrchu.

Tabulka 7: Měření EDS (vzorek 19403-122)

Spectrum Label	Obsah prvků [hm. %]									
	C	N	O	Al	Ti	V	Cr	Fe	Mo	W
122 původní	11,90	8,38	-	-	-	-	79,72	-	-	-
122 30	5,58	-	21,95	-	0,29	0,75	53,82	15,43	0,82	1,35
122 40	5,83	-	21,34	0,11	0,16	0,95	44,55	23,88	1,45	1,75
122 50	9,70	-	17,68	-	0,12	1,20	23,26	42,64	2,49	2,91
122 60	8,91	-	16,17	0,15	-	0,93	8,00	56,91	4,15	4,78

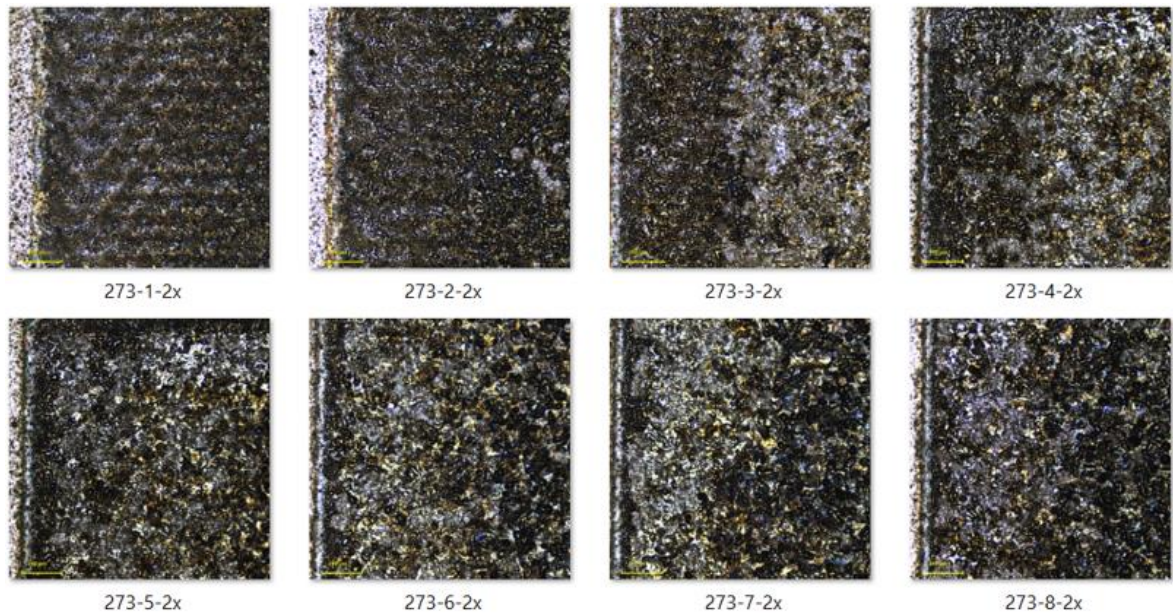
Z měření EDS vyšlo najevo, že došlo ke snížení prvků C, N a Cr. Obsah C 5,58 % byl minimální při 30 přejezdech. Obsah N se snížil na 0 % již od 30 přejezdů. Nejnižší hodnoty Cr 8 % bylo dosaženo při 60 přejezdech.

Vzorek 2

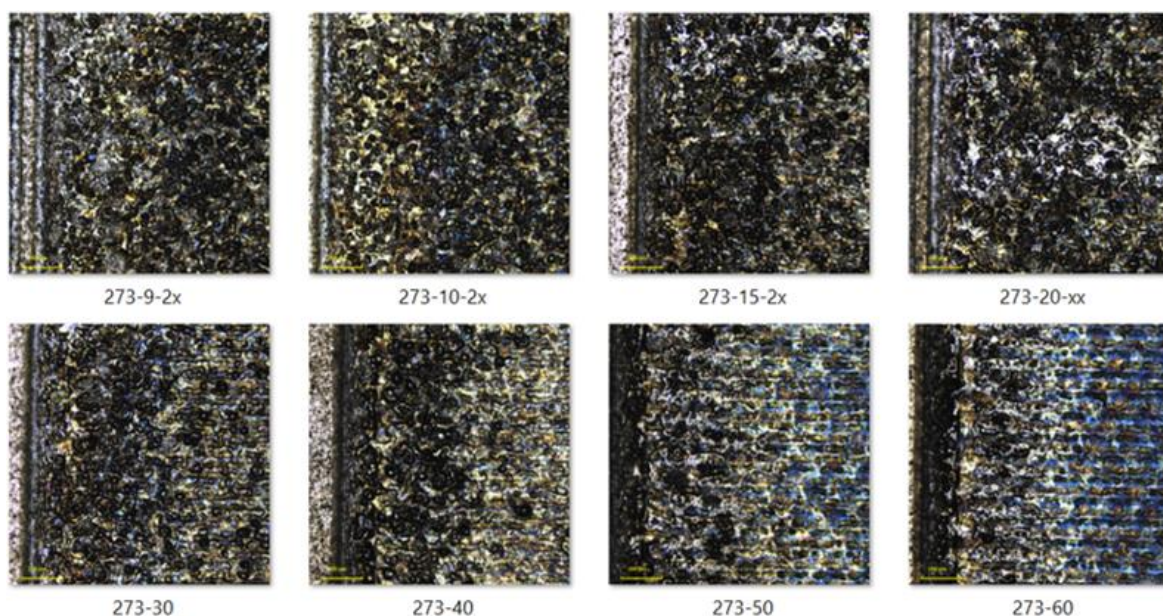
Pro druhý vzorek byl použit laser IPG o výkonu 100 W, frekvenci 3 kHz, rychlosti $500 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$, rozteči šrafování 0,05 mm a počtem přejezdů 1x - 60x. Jako základní materiál byla použita nástrojová ocel 19403 s povlakem CrCN a pořadovým číslem 273.



Obrázek 24: Vzorek 19403-273; počet přejezdů 1-60x



Obrázek 25: Čištěný povrch, vzorek 19403-273 (mikroskop, přejezd 1x-8x)



Obrázek 26. Čištěný povrch, vzorek 19403-273 (mikroskop, přejezd 9x-60x)

Tabulka 8: Měření hloubky úběru a drsnosti povrchu (vzorek 19403-273)

Počet přejezdů	Odebraná vrstva [μm]	Drsnost Ra původní [μm]	Drsnost Ra po čištění laserem [μm]
1	0,523	0,182	1,191
2	-	0,315	1,829
3	3,070	0,136	1,852
4	4,517	0,122	1,362
5	5,595	0,226	2,031
6	6,545	0,199	1,756
7	5,937	0,410	1,929
8	7,200	0,139	2,852
9	7,015	0,324	1,508
10	7,445	0,148	1,103
15	11,416	0,140	1,503
20	10,057	0,123	2,200
30	12,004	0,185	1,182
40	13,532	0,320	0,711
50	17,295	0,136	0,683
60	18,114	0,212	0,916

Při odstraňování vrstvy docházelo k přetavení materiálu nebo nedokonalému odstranění. Při 40 přejezdech bylo dosaženo úběru 13,5 μm, při 50 přejezdech bylo dosaženo úběru 17,3 μm a při 60 přejezdech bylo dosaženo úběru 18,1 μm. Drsnost čištěné plochy laserem byla výrazně vyšší než drsnost původního povrchu.

Tabulka 9: Měření EDS (vzorek 19403-273)

Spectrum Label	Obsah prvků [hm. %]									
	C	N	O	Al	Ti	V	Cr	Fe	Mo	W
273 původní	11,17	7,50	1,44	-	-	-	79,89	-	-	-
273 7	9,20	-	6,80	0,11	-	-	83,47	0,42	-	-
273 30	8,38	8,39	10,4	-	0,15	0,16	69,19	3,32	-	-
273 40	6,24	-	8,67	-	0,46	1,03	44,50	33,96	2,17	2,98
273 50	7,19	-	6,47	-	-	1,19	6,92	62,08	6,83	9,33
273 60	7,79	-	6,65	-	-	1,22	3,09	59,78	9,52	11,96

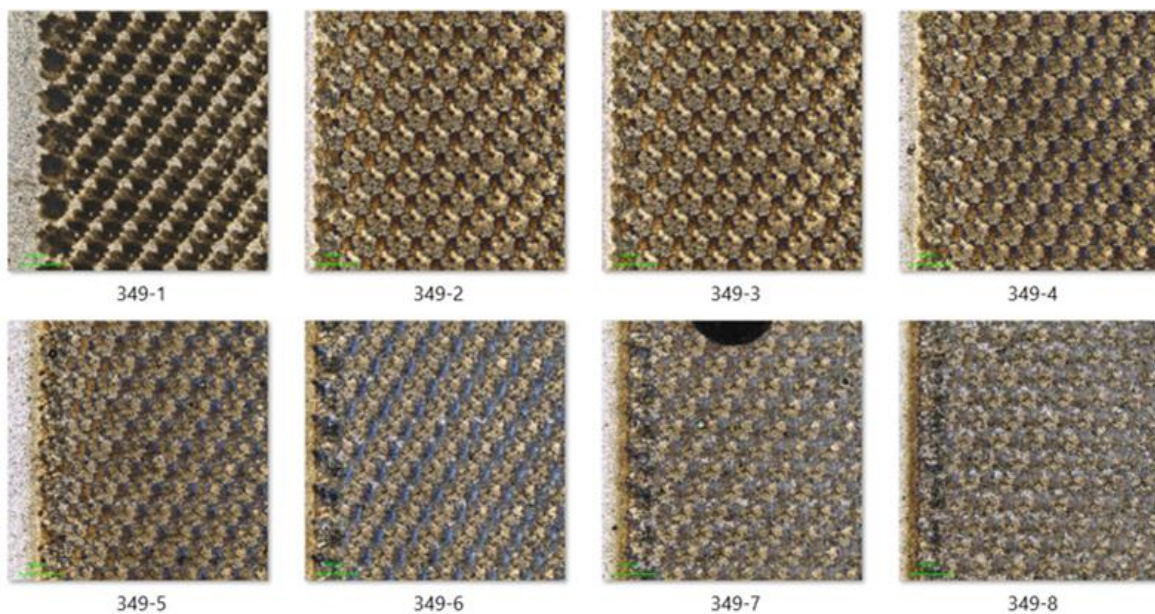
Z měření EDS se prokázalo snížení obsahu Cr, N a C. Cr dosáhlo nejnižší hodnoty 3,09 % pro 60 přejezdů. Obsah N klesl od 40 přejezdů na 0 %. Minimální hodnoty C 6,24 % byly naměřeny pro 40 přejezdů.

Vzorek 3

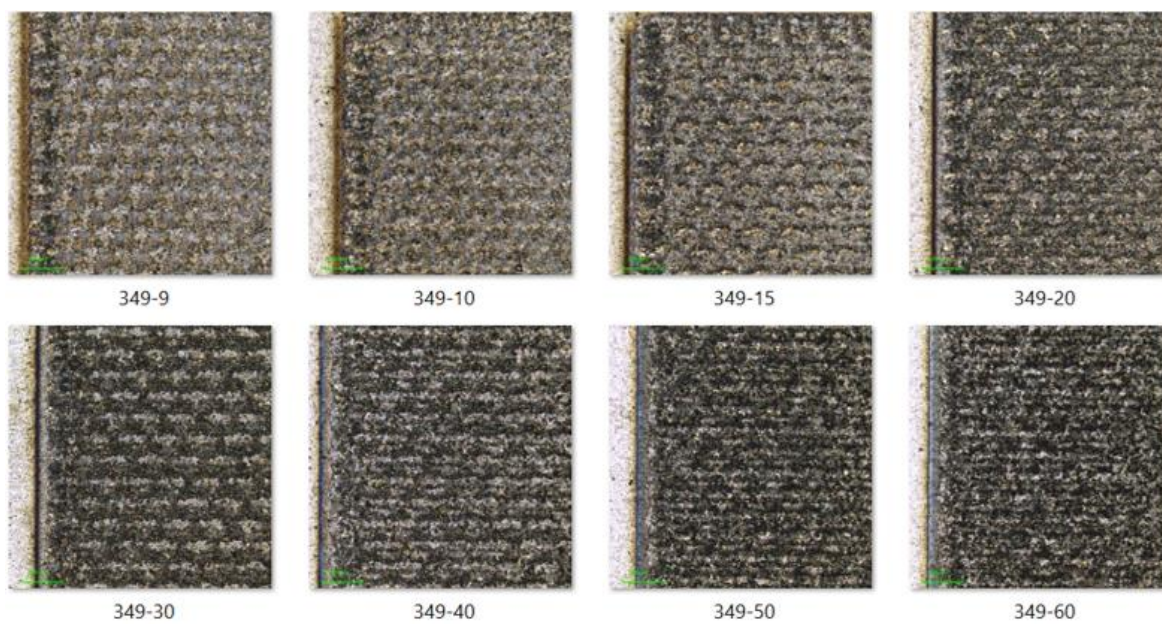
Pro třetí vzorek byl použit laser IPG o výkonu 5 W, frekvenci 3 kHz, rychlosti $500 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$, rozteči šrafování 0,05 mm a počtem přejezdů 1x - 60x. Jako základní materiál byla použita nástrojová ocel 19403 s povlakem CrCN o tloušťce 4,34 μm a pořadovým číslem 349.



Obrázek 27: Vzorek 19403-349; počet přejezdů 1-60x



Obrázek 28: Čištěný povrch, vzorek 19403-349 (mikroskop, přejezd 1x-8x)



Obrázek 29: Čištěný povrch, vzorek 19403-349 (mikroskop, přejezd 9x-60x)

Tabulka 10: Měření hloubky úběru a drsnosti povrchu (vzorek 19403-349)

Počet přejezdů	Odebraná vrstva [μm]	Drsnost Ra původní [μm]	Drsnost Ra po čištění laserem [μm]
1	-	0,030	0,163
2	-	0,074	0,284
3	-	0,176	0,248
4	-	0,152	0,218
5	-	0,168	0,221
6	-	0,166	0,232
7	-	0,139	0,240
8	-	0,150	0,331
9	-	0,132	0,420
10	-	0,164	0,415
15	1,608	0,147	0,444
20	0,747	0,210	0,490
30	-	0,666	0,525
40	1,707	0,116	0,649
50	2,230	0,062	0,707
60	1,769	0,063	0,949

V tomto případě bylo dosaženo nejvyššího úběru 2,2 μm při 50 přejezdech, což je nedostatečné. U všech laserem čištěných ploch došlo k nárůstu drsnosti povrchu.

Tabulka 11: Měření EDS (vzorek 19403-349)

Spectrum Label	Obsah prvků [hm. %]					
	C	N	O	Al	Si	Cr
349 původní	3,62	17,13	-	7,93	-	71,32
349 20	2,90	9,91	4,89	7,03	-	76,27
349 60	3,27	7,76	8,13	6,60	-	74,24

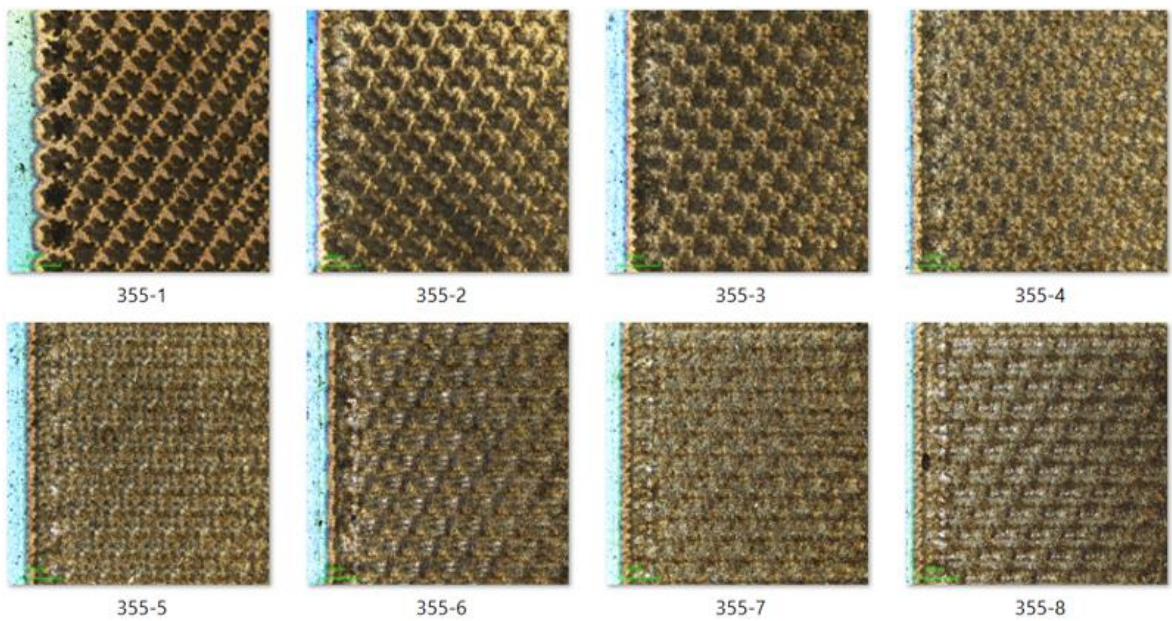
Měření EDS prokázalo vysoké hodnoty Cr, a tudíž nedošlo k odstranění vrstvy povlaku.

Vzorek 4

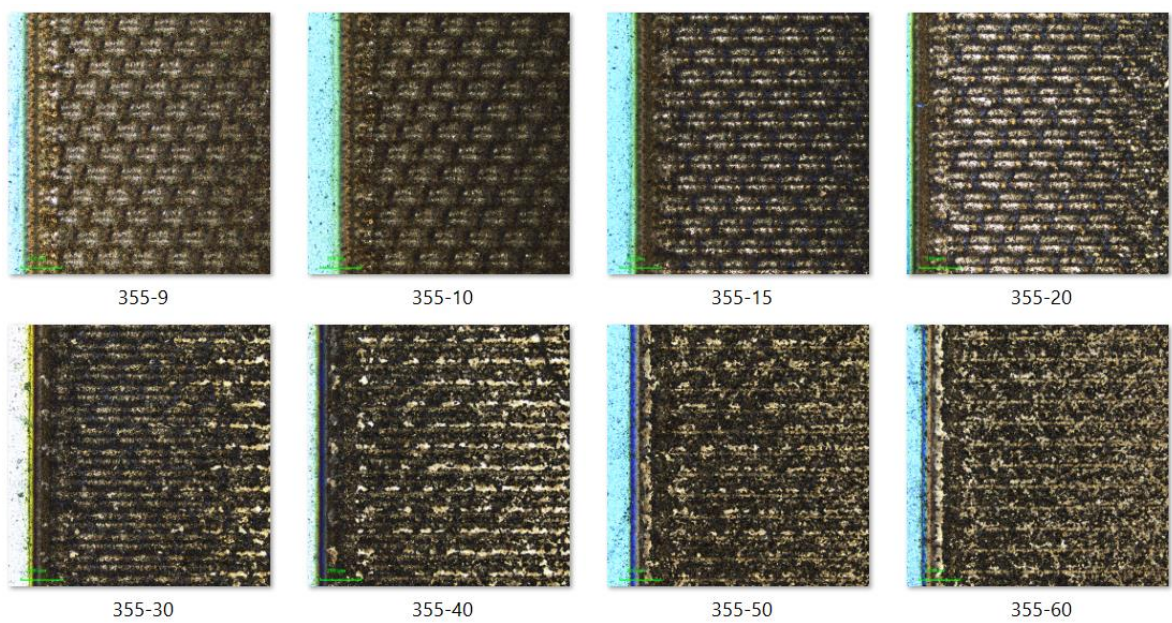
Pro čtvrtý vzorek byl použit laser IPG o výkonu 5 W, frekvenci 3 kHz, rychlosti 500 mm.s⁻¹, rozteči šrafování 0,05 mm a počtem přejezdů 1x - 60x. Jako základní materiál byla použita nástrojová ocel 19308 s povlakem TRIPLE COATING Cr a pořadovým číslem 355.



Obrázek 30: Vzorek 19308-355; počet přejezdů 1-60x



Obrázek 31: Čištěný povrch, vzorek 19308-355 (mikroskop, přejezd 1x-8x)



Obrázek 32: Čištěný povrch, vzorek 19308-355 (mikroskop, přejezd 9x-60x)

Tabulka 12: Měření hloubky úběru a drsnosti povrchu (vzorek 19308-355)

Počet přejezdů	Odebraná vrstva [μm]	Drsnost Ra původní [μm]	Drsnost Ra po čištění laserem [μm]
1	-	0,033	0,082
2	-	0,037	0,100
3	-	0,047	0,106
4	-	0,088	0,140
5	-	0,058	0,140
6	-	0,029	0,183
7	-	0,040	0,159
8	-	0,076	0,201
9	-	0,055	0,213
10	-	0,039	0,202
15	-	0,059	0,272
20	-	0,044	0,287
30	-	0,051	0,413
40	0,373	0,063	0,574
50	1,030	0,051	0,515
60	1,321	0,070	0,427

Nejnižšího úběru 0,37 μm bylo dosaženo při 40 přejezdech. Nejvyššího úběru 1,3 μm bylo dosaženo při 60 přejezdech. U všech laserem čištěných ploch došlo k nárůstu drsnosti povrchu.

Tabulka 13: Měření EDS (vzorek 19308-355)

Spectrum Label	Obsah prvků [hm. %]											
	C	N	O	Al	Si	Ti	V	Cr	Fe	Mo	Ag	W
355 původní	3,08	21,23	-	20,90	-	25,74	-	27,69	1,17	-	0,19	-
355 20	2,62	13,34	11,50	18,09	-	35,21	1,09	10,51	7,49	-	0,18	-
355 60	-	10,26	12,60	12,97	-	31,78	2,09	5,06	21,67	1,45	-	2,09

Z měření EDS se prokázalo snížení hodnoty Cr, která klesla z 27,39 % na 5 % a bylo dosaženo částečného odstranění povlaku při 60 přejezdech.

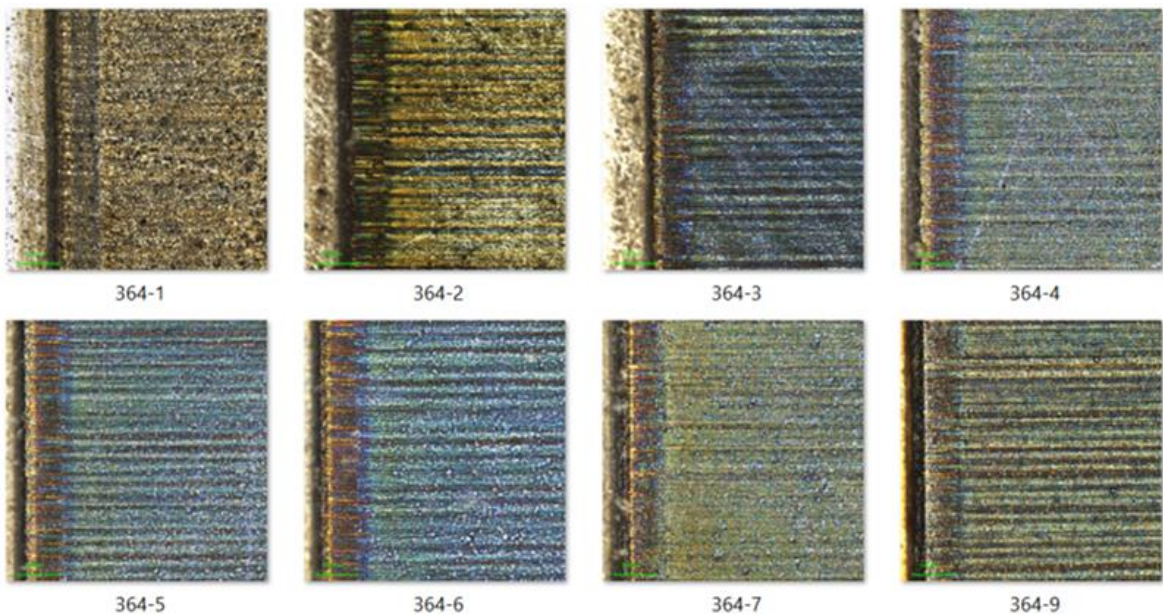
Vzorek 5

Pro pátý vzorek byl použit laser OMRON o výkonu 7,12 W (max.), frekvenci 100 kHz, rychlosti 400 mm.s⁻¹, rozteči šrafování 0,004 mm a počtem přejezdů 1x – 30x. Jako základní

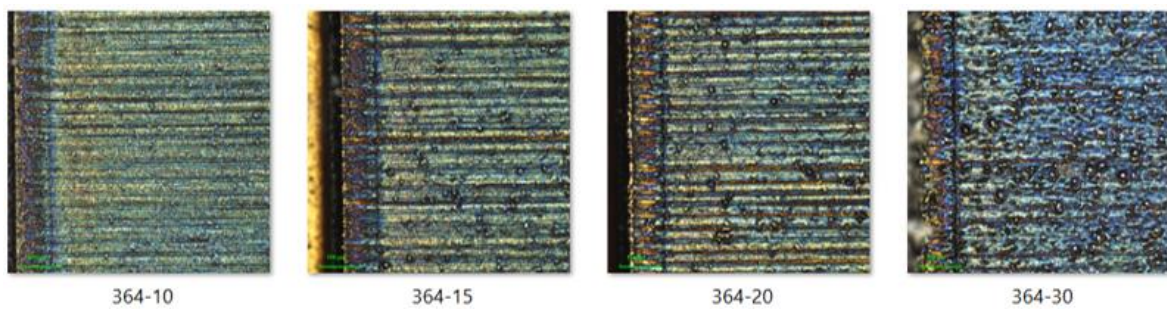
materiál byla použita nástrojová ocel 19403 s povlakem ALWIN o tloušťce 6,2 μm a pořadovým číslem 364. Rozložení pulsů No. 1



Obrázek 33: Vzorek 19403-364; počet přejezdů 1-30x



Obrázek 34: Čištěný povrch, vzorek 19403-364 (mikroskop, přejezd 1x-9x)



Obrázek 35: Čištěný povrch, vzorek 19403-364 (mikroskop, přejezd 10x-30x)

Tabulka 14: Měření hloubky úběru a drsnosti povrchu (vzorek 19403-364)

Počet přejezdů	Odebraná vrstva [μm]	Drsnost Ra původní [μm]	Drsnost Ra po čištění laserem [μm]
1	6,317	0,202	1,980
2	5,970	0,128	0,205
3	6,624	0,069	0,171
4	6,213	0,122	0,149
5	7,362	0,102	0,184
6	7,910	0,081	0,266
7	8,962	0,183	0,300
9	9,585	0,141	0,404
10	9,188	0,111	0,329
15	12,286	0,111	0,332
20	13,439	0,111	0,423
30	17,654	0,134	0,576

Největšího úběru 17,654 μm bylo dosaženo při 30 přejezdech. Požadovaný úběr k odstranění vrstvy s tloušťkou 6,2 μm bylo dosaženo při 3 přejezdech a to 6,6 μm. Drsnost čištěné plochy laserem byla větší než původní drsnost povrchu.

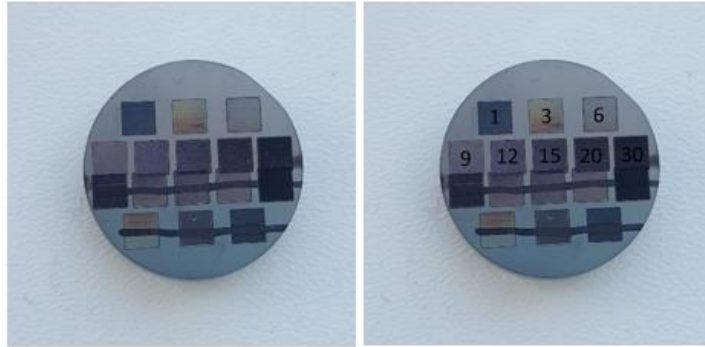
Tabulka 15: Měření EDS (vzorek 19403-364)

Spectrum Label	Obsah prvků [hm. %]										
	C	N	O	Al	Si	V	Cr	Mn	Fe	Mo	W
364 původní	6,50	21,48	2,02	7,77	1,05	-	61,18	-	-	-	-
364 1	12,09	7,07	6,51	1,66	0,25	0,98	34,70	-	34,14	1,17	1,42
364 2	10,90	-	10,28	0,36	-	1,33	9,63	-	60,27	3,21	4,02
364 3	10,71	-	10,83	-	-	1,41	3,75	-	64,16	3,99	5,15
364 4	12,48	-	14,03	-	-	1,28	2,90	-	60,60	3,97	4,72
364 5	12,85	-	12,06	-	-	1,25	3,01	-	62,20	3,65	4,97
364 6	12,41	-	11,59	-	-	1,32	2,95	-	62,69	3,93	5,10
364 7	13,70	-	13,95	0,12	-	1,23	2,94	-	59,32	3,87	4,86
364 9	12,22	-	16,02	-	-	1,27	2,99	-	58,88	3,84	4,77
364 10	10,20	-	14,04	-	-	1,37	3,10	-	61,79	4,20	5,30
364 15	10,90	-	13,12	-	-	1,22	2,95	-	62,96	3,84	4,99
364 20	14,11	-	11,50	-	-	1,18	2,82	0,30	61,38	3,84	4,86
364 30	13,47	-	10,01	-	-	1,34	3,02	-	62,95	4,04	5,18

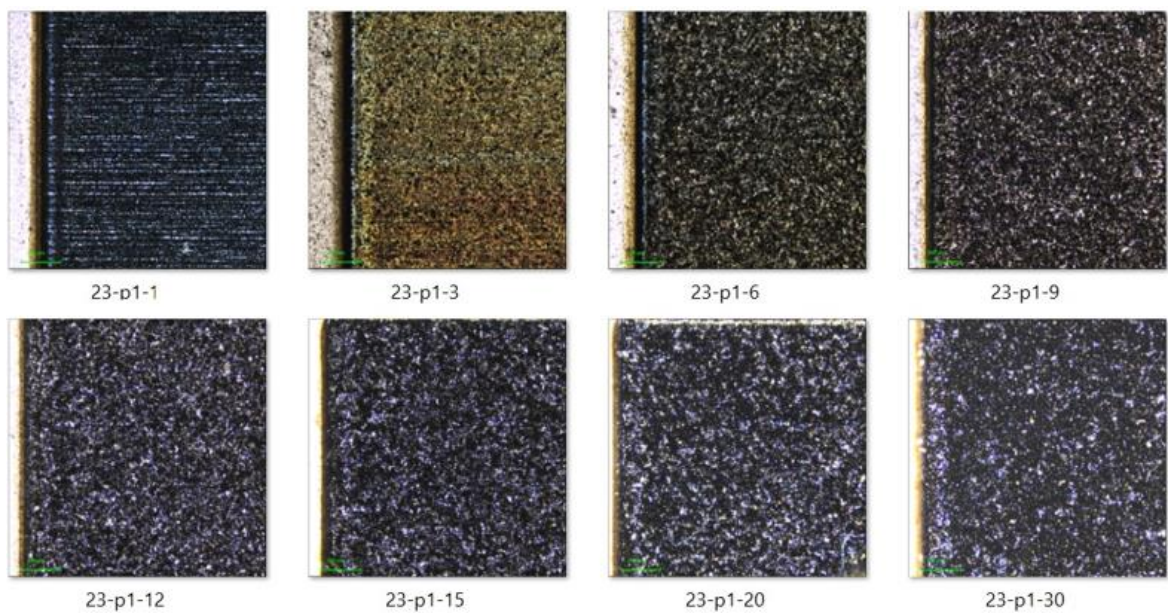
Měření EDS prokázalo snížení obsahu N, Al a Si na 0 %. Nejnižší hodnota obsahu Cr 2,82 % byla dosažena pro 20 přejezdů.

Vzorek 6

Pro šestý vzorek byl použit laser OMRON o výkonu 7,12 W (max.), frekvenci 100 kHz, rychlosti 400 mm.s⁻¹, rozteči šrafování 0,004 mm a počtem přejezdů 1x – 30x. Jako základní materiál byla použita nástrojová ocel 19403 s povlakem VANADIN o tloušťce 5,24 μm a pořadovým číslem 23. Rozložení pulsů No. 1



Obrázek 36: Vzorek 19403-23; počet přejezdů 1-30x



Obrázek 37: Čištěný povrch, vzorek 19403-23 (mikroskop, přejezd 1x-30x)

Tabulka 16: Měření hloubky úběru a drsnosti povrchu (vzorek 19403-23)

Počet přejezdů	Odebraná vrstva [μm]	Drsnost Ra původní [μm]	Drsnost Ra po čištění laserem [μm]
1	5,416	0,176	2,036
3	5,410	0,171	0,416
6	7,180	0,168	0,715
9	8,080	0,150	1,208
12	10,998	0,129	1,639
15	11,174	0,175	2,862
20	13,838	0,102	2,611
30	23,719	0,196	7,529

Dosažený maximální úběr 23,719 μm byl při 30 přejezdech. Při 1 přejezdu byl dosažen úběr 5,419 μm, který je dostačující k odstranění tloušťky vrstvy povlaku. Drsnost čištěné plochy laserem byla větší než původní drsnost povrchu.

Tabulka 17: Měření EDS (vzorek 19403-23)

Spectrum Label	Obsah prvků [hm. %]										
	C	N	O	Al	Si	V	Cr	Mn	Fe	Mo	W
23 původní	4,33	21,50	-	0,12	0,09	35,39	38,36	-	-	-	-
23 1	7,15	5,38	8,63	1,16	-	10,36	28,13	-	36,11	1,43	1,64
23 3	12,04	-	9,81	-	-	1,83	5,97	-	61,63	3,94	4,77
23 6	9,72	-	10,14	-	-	1,22	3,01	-	66,36	4,47	5,09
23 9	11,64	-	11,13	-	-	1,26	2,75	-	64,73	4,10	4,39
23 12	9,32	-	11,83	-	-	1,21	2,82	-	66,54	4,01	4,27
23 15	6,94	-	12,58	-	-	1,14	2,90	-	68,50	3,79	4,14
23 20	10,98	-	13,53	-	-	1,10	2,73	0,25	64,66	3,24	3,51
23 30	9,01	-	15,79	0,13	-	0,98	2,64	-	65,17	3,22	3,05

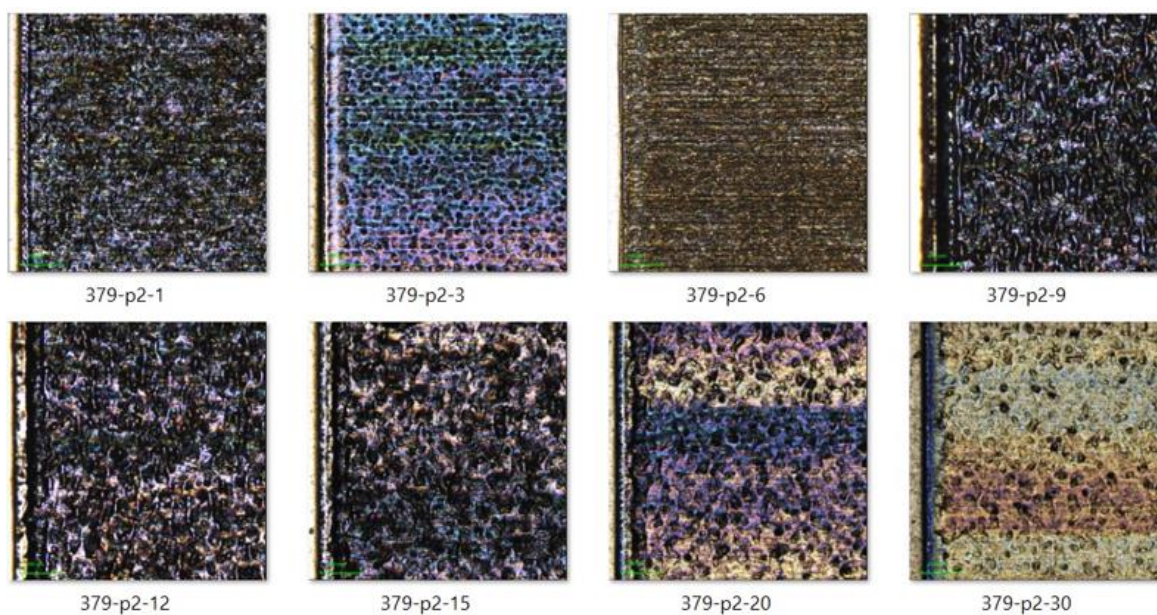
Měření EDS ukázalo, že se obsah N, Al, a Si snížil na 0 % pro 3 a více přejezdů. Hodnota obsahu V klesla na 0,98 % po 30 přejezdech a hodnota obsahu Cr klesla na 2,64 % po 30 přejezdech.

Vzorek 7

Pro sedmý vzorek byl použit laser OMRON o výkonu 7,12 W (max.), frekvenci 500 kHz, rychlosti 400 mm.s⁻¹, rozteči šrafování 0,004 mm a počtem přejezdů 1x - 30x. Jako základní materiál byla použita nástrojová ocel 19403 s povlakem VANADIN o tloušťce 5,48 μm a pořadovým číslem 379. Rozložení pulsů No. 1



Obrázek 38: Vzorek 19403-379; počet přejezdů 1-30x



Obrázek 39: Čištěný povrch, vzorek 19403-379 (mikroskop, přejezd 1x-30x)

Tabulka 18: Měření hloubky úběru a drsnosti povrchu (vzorek 19403-379)

Počet přejezdů	Odebraná vrstva [μm]	Drsnost Ra původní [μm]	Drsnost Ra po čištění laserem [μm]
1	5,207	0,305	1,775
3	7,111	0,106	0,477
6	10,567	0,165	1,203
9	10,330	0,197	0,423
12	15,676	0,201	0,719
15	18,616	0,103	1,348
20	26,059	0,175	1,437
30	33,819	0,192	2,174

Bylo dosaženo úběru 33,819 μm pro 30 přejezdů. Při prvním přejezdu bylo dosaženo úběru 5,207 μm, který se blíží tloušťce vrstvy povlaku. Drsnost čištěné plochy laserem byla větší než původní drsnost povrchu.

Tabulka 19: Měření EDS (vzorek 19403-379)

Spectrum Label	Obsah prvků [hm. %]								
	C	N	O	Al	V	Cr	Fe	Mo	W
379 původní	5,03	21,24	-	0,15	35,05	38,54	-	-	-
379 1	20,57	-	13,80	1,11	5,71	14,67	40,08	1,90	2,15
379 3	6,68	-	12,04	-	1,04	3,88	67,17	4,30	4,89
379 6	7,96	-	12,52	-	0,69	2,14	67,19	4,74	4,76
379 9	5,95	-	9,71	-	0,84	1,96	67,70	7,09	6,75
379 12	5,92	-	10,45	0,14	0,75	1,78	69,22	6,05	5,68
379 15	7,31	-	10,97	-	0,78	1,95	68,17	5,46	5,36
379 20	7,86	-	11,97	-	0,60	1,83	67,90	5,11	4,75
379 30	7,87	-	13,63	-	0,65	2,02	66,72	4,61	4,50

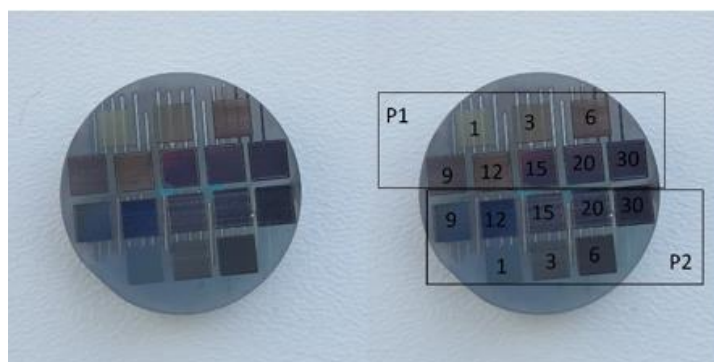
Měření EDS prokázalo již pro 1. a následující přejezdy pokles obsahu N na 0 %. Obsah Cr klesl na hodnotu 1,83 % a obsah V klesl na hodnotu 0,6 % při 20 přejezdech.

Vzorek 8

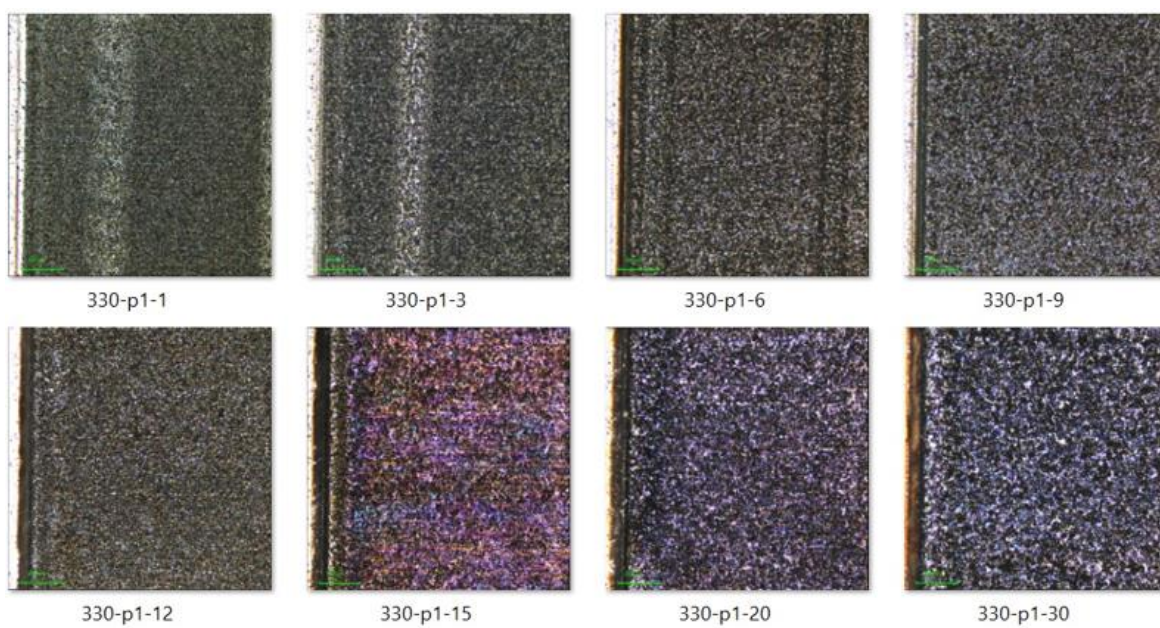
Pro osmý vzorek byl použit jako základní materiál nástrojová ocel 19403 s povlakem CrCN o tloušťce 11,14 μm a pořadovým číslem 330. Byl použit laser OMRON s dvojitým nastavením parametrů.

Pro parametr 1 byl nastaven výkon 7,12 W (max.), frekvence 100 kHz, rychlost 400 $\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$, rozteč šrafování 0,004 mm, počet přejezdů 1x - 30x, rozložení pulsů No. 1.

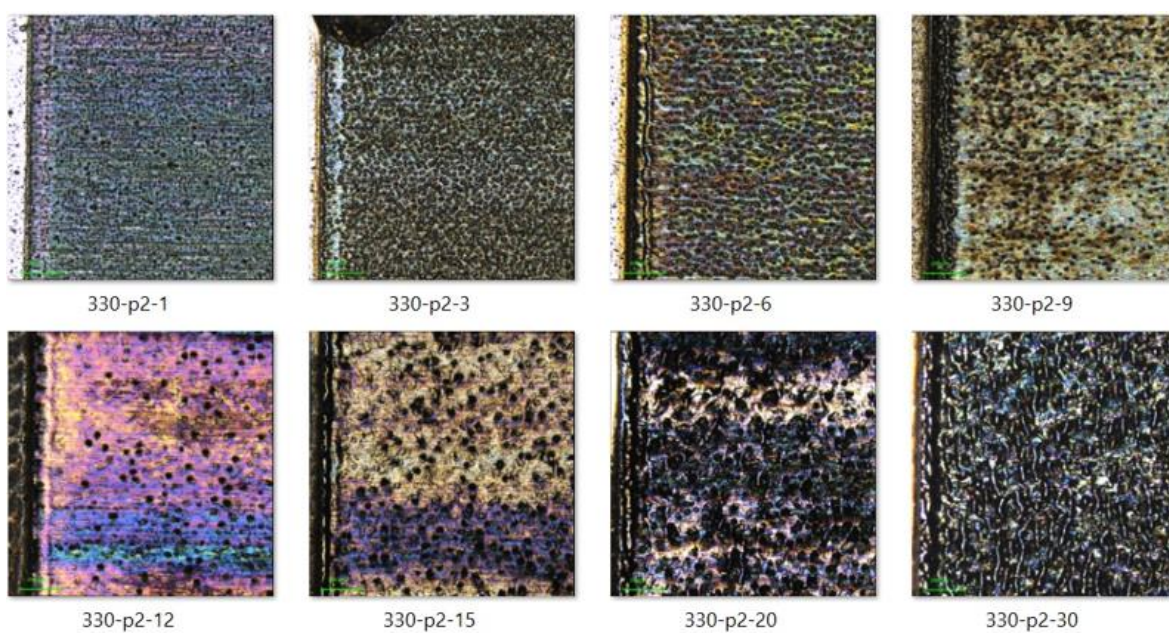
Pro parametr 2 byl nastaven výkon 7,12 W (max.), frekvence 500 kHz, rychlost 400 $\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$, rozteč šrafování 0,004 mm, počet přejezdů 1x - 30x, rozložení pulsů No. 1.



Obrázek 40: Vzorek 19403-330; počet přejezdů 1-30x



Obrázek 41: Čištěný povrch, vzorek 19403-330 (mikroskop, přejezd 1x-30x, parametry 1)



Obrázek 42: Čištěný povrch, vzorek 19403-330 (mikroskop, přejezd 1x-30x, parametry 2)

Tabulka 20: Měření hloubky úběru a drsnosti povrchu (vzorek 19403-330)

Počet přejezdů	Odebraná vrstva [μm]	Drsnost Ra původní [μm]	Drsnost Ra po čištění laserem [μm]
1 (P1)	-	0,145	0,823
3 (P1)	-	0,156	1,639
6 (P1)	2,879	0,110	1,681
9 (P1)	4,191	0,221	1,317
12 (P1)	9,570	0,107	1,911
15 (P1)	10,511	0,253	0,598
20 (P1)	13,787	0,140	1,179
30 (P1)	19,602	0,204	1,921
1 (P2)	1,175	0,102	0,446
3 (P2)	3,889	0,076	1,317
6 (P2)	8,765	0,135	1,276
9 (P2)	9,283	0,157	0,322
12 (P2)	14,802	0,193	0,323
15 (P2)	18,918	0,117	0,756
20 (P2)	22,864	0,116	2,090
30 (P2)	34,066	0,232	4,410

Maximální úběr 34,066 μm byl dosažen pro 30 přejezdů s nastavením parametru 2. Úběru 10,511 μm blízkého tloušťce povlaku bylo dosaženo u nastavení parametru 1 při 15 přejezdech a úběru 14,802 μm u nastavení parametru 2 při 12 přejezdech. Drsnost čištěné plochy laserem byla větší než drsnost původního povrchu.

Tabulka 21: Měření EDS (vzorek 19403-330)

Spectrum Label	Obsah prvků [hm. %]							
	C	N	O	V	Cr	Fe	Mo	W
330 původní	16,06	6,09	-	-	77,85	-	-	-
330 P1 1	11,90	-	9,17	-	78,93	-	-	-
330 P1 12	9,41	-	14,28	0,81	51,66	21,33	1,09	1,43
330 P1 15	8,84	-	13,13	1,36	6,45	61,06	3,94	5,21
330 P1 20	13,61	-	13,25	1,13	2,68	61,46	3,67	4,21
330 P1 30	9,67	-	13,48	1,14	2,70	64,65	4,02	4,34
330 P2 9	4,93	-	14,84	0,79	25,85	45,97	3,38	4,24
330 P2 12	5,67	-	11,05	-	3,17	68,10	5,65	6,35
330 P2 15	8,99	-	9,64	0,49	1,60	67,53	5,92	5,82
330 P2 20	10,98	-	11,74	0,58	1,73	65,07	5,14	4,77
330 P2 30	12,03	-	13,80	0,61	1,83	63,05	4,61	4,06

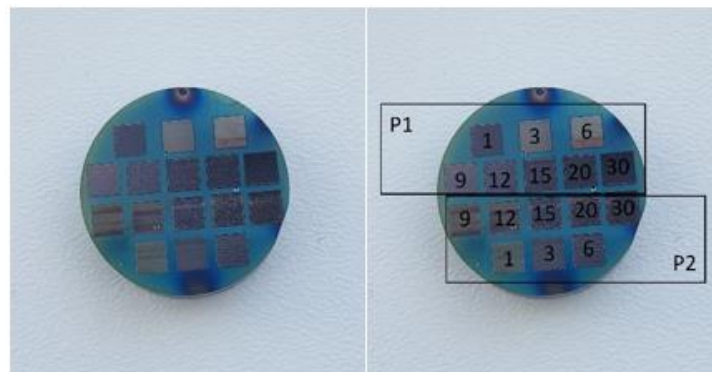
Měření EDS ukázalo pokles obsahu N a Si na 0 % u všech čištěných ploch laserem. Nejnižší hodnoty C 4,93 % bylo dosaženo pro 9 přejezdů s nastavením parametru 2. Obsah Cr klesl na hodnotu 1,6 % pro 15 přejezdů s nastavením parametru 2.

Vzorek 9

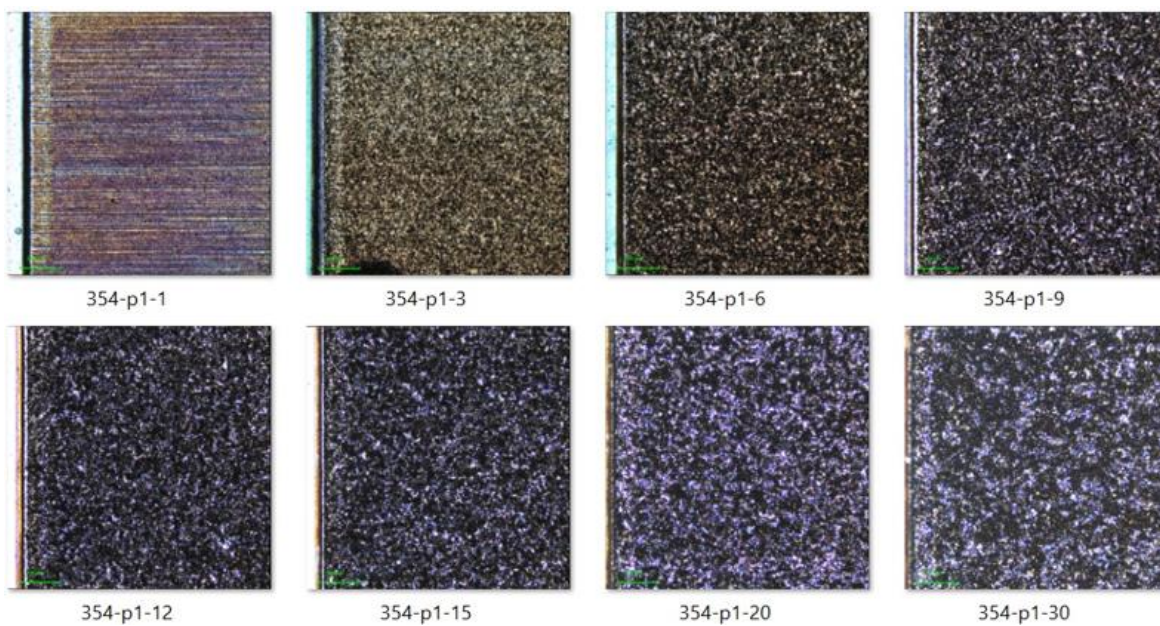
Pro devátý vzorek byl použit jako základní materiál nástrojová ocel 19403 s povlakem TRIPLE COATING Cr a pořadovým číslem 354. Byl použit laser OMRON s dvojitým nastavením parametrů.

Pro parametr 1 byl nastaven výkon 7,12 W (max.), frekvence 100 kHz, rychlost 400 mm.s⁻¹, rozteč šrafování 0,004 mm, počet přejezdů 1x - 30x, rozložení pulsů No. 1.

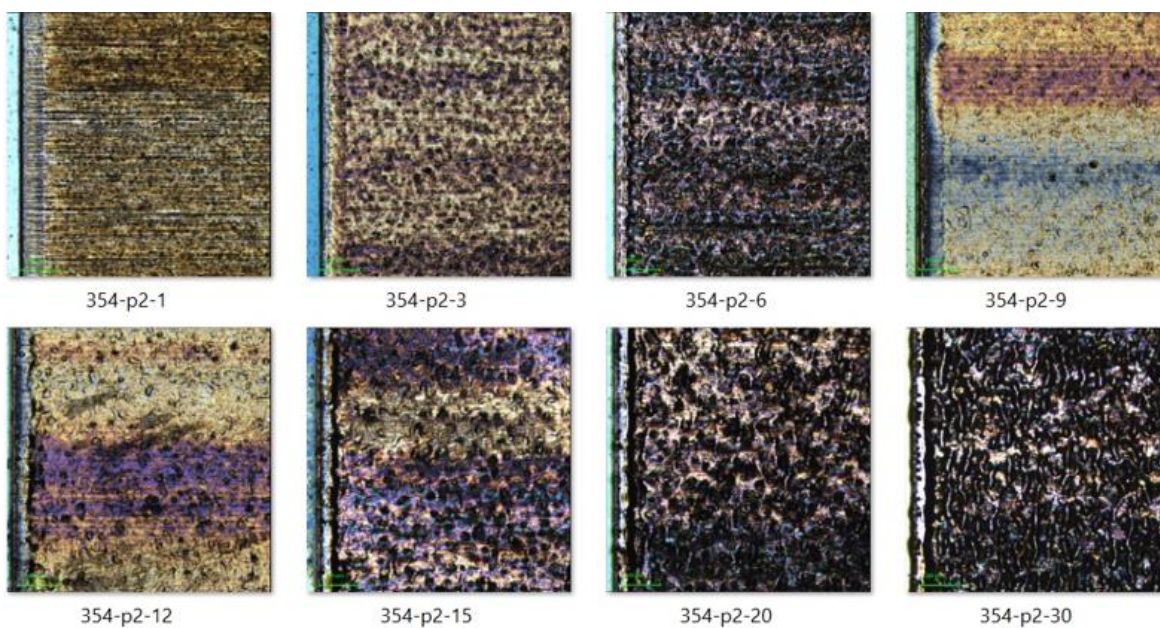
Pro parametr 2 byl nastaven výkon 7,12 W (max.), frekvence 500 kHz, rychlost 400 mm.s⁻¹, rozteč šrafování 0,004 mm, počet přejezdů 1x - 30x, rozložení pulsů No. 1.



Obrázek 43: Vzorek 19403-354; počet přejezdů 1-30x



Obrázek 44: Čištěný povrch, vzorek 19403-354 (mikroskop, přejezd 1x-30x, parametry 1)



Obrázek 45: Čištěný povrch, vzorek 19403-354 (mikroskop, přejezd 1x-30x, parametry 2)

Tabulka 22: Měření hloubky úběru a drsnosti povrchu (vzorek 19403-354)

Počet přejezdů	Odebraná vrstva [μm]	Drsnost Ra původní [μm]	Drsnost Ra po čištění laserem [μm]
1 (P1)	1,983	0,044	0,096
3 (P1)	2,542	0,054	0,417
6 (P1)	3,703	0,046	0,676
9 (P1)	4,815	0,056	1,492
12 (P1)	5,604	0,047	1,235
15 (P1)	9,297	0,081	1,620
20 (P1)	12,616	0,037	1,911
30 (P1)	19,573	0,059	2,903
1 (P2)	2,247	0,050	0,505
3 (P2)	4,093	0,044	0,592
6 (P2)	8,124	0,032	0,978
9 (P2)	6,890	0,076	0,525
12 (P2)	9,712	0,034	0,442
15 (P2)	14,798	0,043	1,012
20 (P2)	21,051	0,046	1,864
30 (P2)	30,253	0,029	1,375

Nejvyššího úběru 30,253 μm bylo dosaženo pro 30 přejezdů s nastavením parametru 2. Drsnost čištěné plochy laserem byla větší než drsnost původního povrchu.

Tabulka 23: Měření EDS (vzorek 19403-354)

Spectrum Label	Obsah prvků [hm. %]										
	C	N	O	Al	Si	Ti	V	Cr	Fe	Mo	W
354 původní	6,98	24,31	1,93	19,68	1,41	22,22	-	22,40	1,07	-	-
354 P1 1	12,73	-	11,85	2,50	-	5,67	3,77	3,80	49,93	4,29	5,47
354 P1 3	12,04	-	9,49	0,11	-	-	1,45	2,83	64,04	4,44	5,60
354 P1 6	18,07	-	9,49	0,15	-	-	1,17	2,53	59,85	4,09	4,66
354 P1 9	8,10	-	11,07	-	-	-	1,26	2,87	66,95	4,72	5,03
354 P1 12	16,07	-	11,93	-	-	-	1,08	2,44	61,16	3,49	3,83
354 P1 15	12,39	-	12,91	-	-	-	1,18	2,60	63,37	3,72	3,82
354 P1 20	21,05	-	12,67	0,12	-	-	0,85	2,22	56,63	3,13	3,34
354 P1 30	16,57	-	13,69	0,23	-	-	0,93	2,48	59,74	3,13	3,24
354 P2 1	8,50	-	10,59	1,68	-	1,94	1,58	3,59	63,63	3,81	4,68
354 P2 3	4,80	-	9,54	0,24	-	-	0,66	1,97	70,95	5,87	5,97
354 P2 6	7,31	-	11,04	0,20	-	-	0,61	1,88	68,58	5,26	5,13
354 P2 9	4,84	-	8,57	-	-	-	0,65	1,74	67,99	8,38	7,82
354 P2 12	5,35	-	8,84	0,19	-	-	0,61	1,56	69,27	7,37	6,81
354 P2 15	10,03	-	10,73	0,15	-	-	0,60	1,71	66,19	5,38	5,21
354 P2 20	8,46	-	12,32	0,18	-	-	0,66	1,97	66,85	3,79	4,76
354 P2 30	9,34	-	12,98	0,23	-	-	0,54	1,74	65,77	5,05	4,36

Měření EDS ukázalo pokles obsahu N a Si na 0 % u všech čištěných ploch laserem. Obsah Ti klesl na 0 % pro 3 a více přejezdů u obou nastavení parametrů. Obsah Cr klesl na minimální hodnotu 1,56 % pro 12 přejezdů s nastavením parametru 2.

Vzorek 10

Pro desátý vzorek byl použit jako základní materiál nástrojová ocel 19403 s povlakem ALWIN o tloušťce 5,03 μm a pořadovým číslem 73.

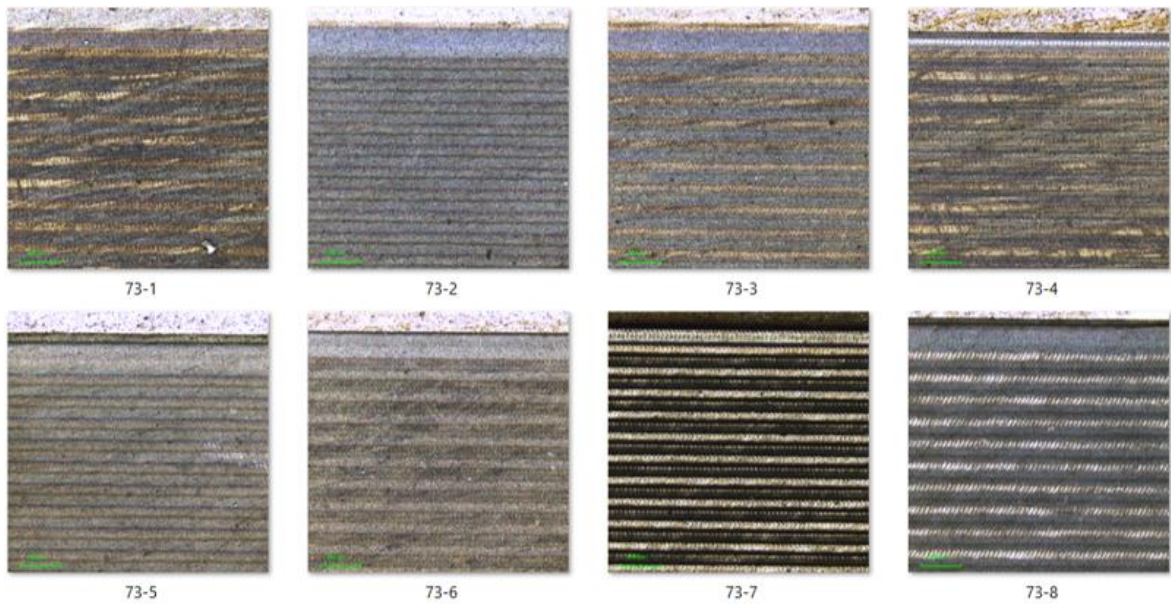
Byl použit laser PERLA C o výkonu 10 W, frekvenci 50 kHz, rychlosti $1000 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ a rozteči šrafování 0,05 mm. Další podrobné nastavení zobrazuje Tabulka 24 níže.

Tabulka 24: Rozpis nastavení parametrů čištěných čtverců (vzorek 19403-73)

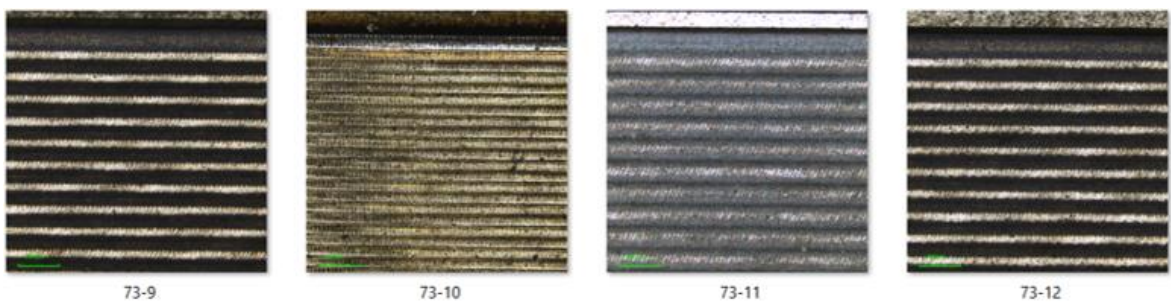
Číslo čtverce	Fokus [mm]		
	1,5	2,5	2
Počet přejezdů			
1	1	2	3
5	4	5	6
10	7	8	9
20	10	11	12



Obrázek 46: Vzorek 19403-73



Obrázek 47: Čištěný povrch, vzorek 19403-73 (mikroskop)



Obrázek 48: Čištěný povrch, vzorek 19403-73 (mikroskop)

Tabulka 25: Měření hloubky úběru a drsnosti povrchu (vzorek 19403-73)

Číslo čtverce	Odebraná vrstva [μm]	Drsnost Ra původní [μm]	Drsnost Ra _x po čištění laserem [μm]	Drsnost Ra _y po čištění laserem [μm]
1	0,500	-	-	-
2	0,700	-	-	-
3	0,500	-	-	-
4	3,100	0,249	0,316	0,339
5	3,300	0,197	0,183	0,250
6	3,200	0,275	0,227	0,292
7	5,500	0,326	0,354	0,326
8	6,300	0,253	0,294	0,272
9	5,400	0,241	0,209	0,224
10	6,500	0,344	0,250	0,294
11	9,600	0,301	0,228	0,378
12	8,700	0,315	0,319	0,267

Bylo dosaženo úběru 8,7 μm . Při nastavených parametrech 7 byl úběr 5,5 μm , což se blíží tloušťce povlaku. Drsnost čištěné plochy laserem byla lehce větší než drsnost původního povrchu.

Tabulka 26: Měření EDS (vzorek 19403-73)

Spectrum Label	Obsah prvků [hm. %]											
	C	N	O	Al	Si	V	Cr	Fe	Ni	Sr	Mo	W
73 původní	4,98	21,54	1,12	8,57	1,07	-	62,71	-	-	-	-	-
73 4	4,57	18,90	4,05	6,11	0,81	-	64,91	0,66	-	-	-	-
73 5	4,53	20,05	2,68	5,53	0,68	-	65,43	1,11	-	-	-	-
73 6	4,10	19,45	3,43	6,02	0,81	-	65,10	0,91	0,19	-	-	-
73 7	6,83	5,67	3,99	0,74	0,23	1,87	11,18	62,38	-	-	3,08	4,02
73 8	7,86	-	1,95	-	-	1,54	3,87	75,37	-	-	3,83	5,58
73 9	6,89	-	2,22	0,21	0,44	1,62	3,93	75,84	-	0,96	3,57	4,33
73 10	8,29	-	3,63	0,16	-	1,71	3,84	72,55	-	-	3,94	5,89
73 11	6,83	-	1,69	0,17	-	1,68	3,88	75,59	-	-	4,07	6,09
73 12	6,96	-	1,85	0,22	-	1,60	3,94	75,23	-	-	4,06	6,13

Měření EDS ukázalo pokles obsahu N na 0 % s nastavenými parametry 8 až 12. Obsah Si klesl na 0 % pro 20 přejezdů, tj. nastavení parametrů 10, 11 a 12, a s nastavením parametru 8. Obsah Cr klesl na hodnotu 3,84 % s nastaveným parametrem 10. Obsah Al klesl na hodnotu 0 % s nastaveným parametrem 8.

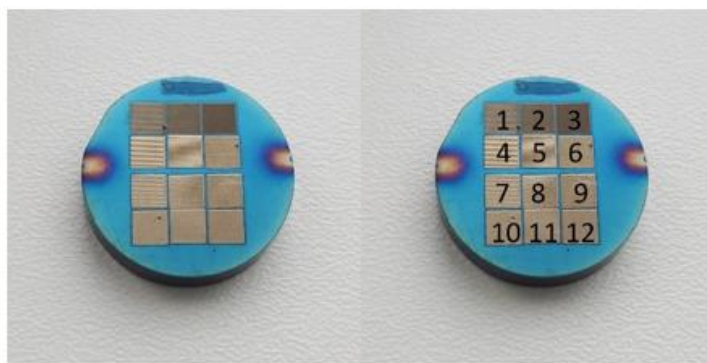
Vzorek 11

Pro jedenáctý vzorek byl použit jako základní materiál nástrojová ocel 19308 s povlakem TRIPLE COATING Cr a pořadovým číslem 356.

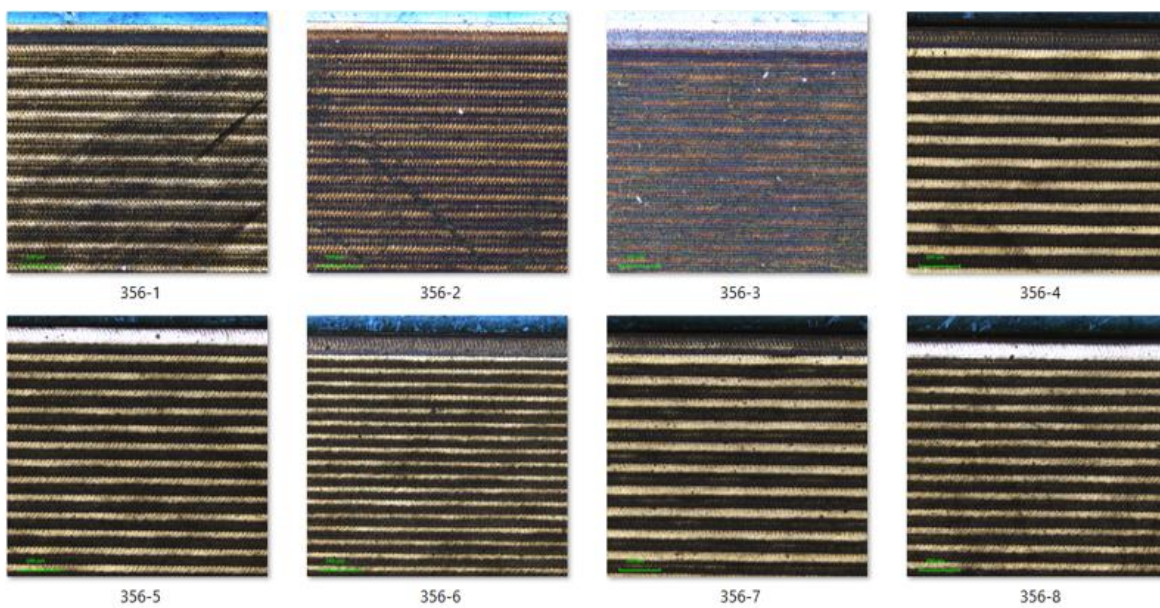
Byl použit laser PERLA C o výkonu 10 W, frekvenci 50 kHz, rychlosti $1000 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ a fokusem 2 mm. Další podrobné nastavení zobrazuje Tabulka 27 Tabulka 24 níže.

Tabulka 27: Rozpis nastavení parametrů čištěných čtverců (vzorek 19308-356)

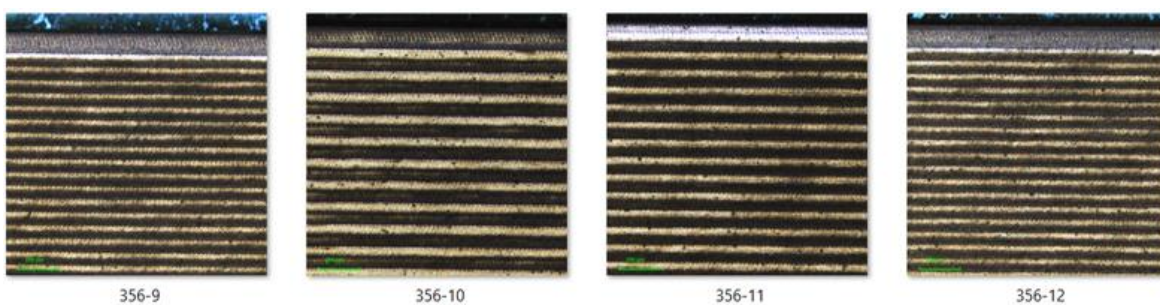
Číslo čtverce	Rozteč šrafování [mm]		
	0,05	0,04	0,03
1	1	2	3
5	4	5	6
10	7	8	9
20	10	11	12



Obrázek 49: Vzorek 19308-356



Obrázek 50: Čištěný povrch, vzorek 19308-356 (mikroskop)



Obrázek 51: Čištěný povrch, vzorek 19308-356 (mikroskop)

Tabulka 28: Měření hloubky úběru a drsnosti povrchu (vzorek 19308-356)

Číslo čtverce	Odebraná vrstva [μm]	Drsnost Ra původní [μm]	Drsnost Ra _x po čištění laserem [μm]	Drsnost Ra _y po čištění laserem [μm]
1	0,600	-	-	-
2	0,400	-	-	-
3	0,500	-	-	-
4	2,100	0,085	0,148	0,214
5	2,500	0,133	0,117	0,218
6	2,900	0,121	0,172	0,226
7	3,500	0,078	0,179	0,304
8	4,200	0,108	0,251	0,244
9	5,000	0,070	0,185	0,232
10	5,700	0,206	0,197	0,460
11	7,000	0,381	0,212	0,316
12	10,200	0,330	0,248	0,320

Byla dosažena hloubka úběru 10,2 μm. Drsnost čištěné plochy laserem byla lehce větší než drsnost původního povrchu.

Tabulka 29: Měření EDS (vzorek 19308-356)

Spectrum Label	Obsah prvků [hm. %]											
	C	N	O	Al	Si	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Mo	W
356 původní	4,70	23,31	2,50	19,01	0,94	27,86	0,65	16,68	-	3,89	0,47	-
356 4	8,48	-	2,31	0,23	-	-	2,14	3,94	0,33	72,44	4,14	5,98
356 5	7,54	-	2,16	-	-	-	1,66	3,79	0,43	74,63	4,01	5,78
356 6	7,37	-	2,44	-	-	-	1,79	3,96	0,43	73,9	4,01	6,11
356 7	7,55	-	2,40	-	-	-	1,65	3,90	0,38	74,47	4,04	5,61
356 9	7,82	-	2,59	-	-	-	1,72	3,98	0,43	73,73	3,92	5,82
356 10	7,24	-	2,48	0,17	-	-	1,72	3,95	0,39	74,08	3,89	6,07
356 11	7,96	-	2,36	-	-	-	1,82	3,86	0,46	73,51	4,00	6,04
356 12	7,61	-	2,41	0,17	-	-	1,72	3,89	0,35	74,08	3,99	5,79

Z měření EDS se prokázalo snížení obsahu N, Si a Ti na hodnotu 0 % pro všechny čištěné plochy laserem. Obsah Cr klesl na hodnotu 3,79 % s nastaveným parametrem 5.

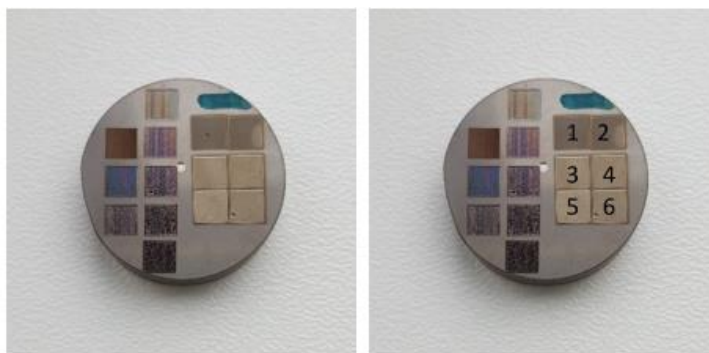
Vzorek 12

Pro dvanáctý vzorek byl použit jako základní materiál nástrojová ocel 19403 s povlakem VANADIN o tloušťce 5,48 μm a pořadovým číslem 379.

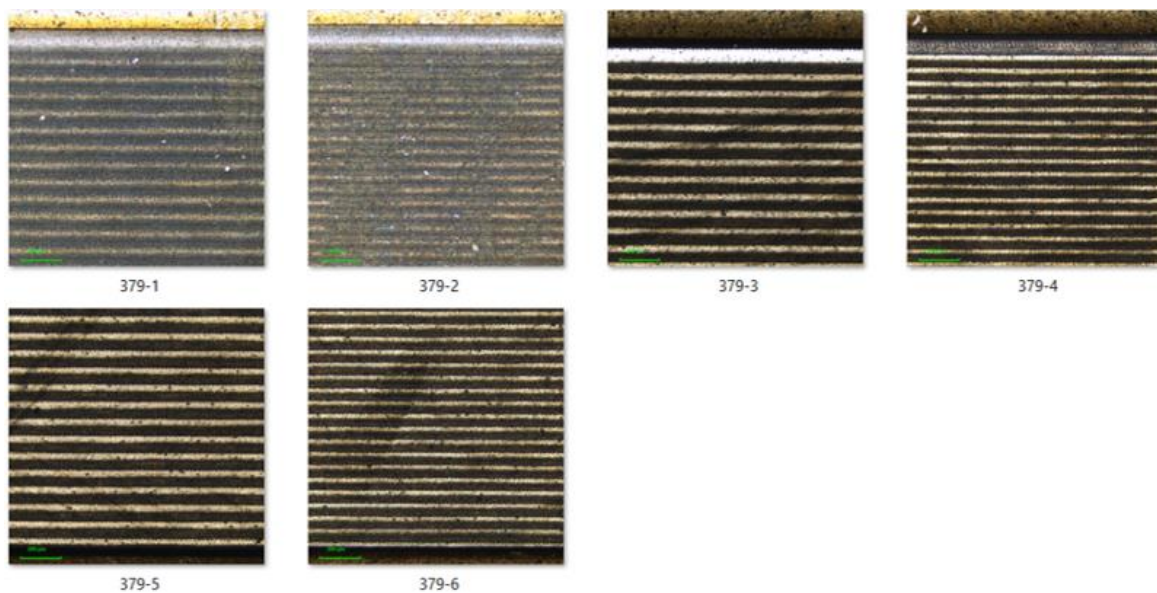
Byl použit laser PERLA C o výkonu 10 W, frekvenci 50 kHz, rychlosti 1000 mm.s⁻¹ a fokusem 2 mm. Další podrobné nastavení zobrazuje Tabulka 30 níže.

Tabulka 30: Rozpis nastavení parametrů čištěných čtverců (vzorek 19403-379)

Číslo čtverce	Rozteč šrafování [mm]	
	0,04	0,03
5	1	2
10	3	4
20	5	6



Obrázek 52: Vzorek 19403-379



Obrázek 53: Čištěný povrch, vzorek 19403-379 (mikroskop)

Tabulka 31: Měření hloubky úběru a drsnosti povrchu (vzorek 19403-379)

Číslo čtverce	Odebraná vrstva [μm]	Drsnost Ra původní [μm]	Drsnost Ra _x po čištění laserem [μm]	Drsnost Ra _y po čištění laserem [μm]
1	2,700	0,254	0,365	0,297
2	3,800	0,346	0,283	0,318
3	5,800	0,347	0,251	0,216
4	6,400	0,226	0,173	0,216
5	8,900	0,267	0,265	0,284
6	12,200	0,305	0,167	0,289

Bylo dosaženo úběru hodnoty 12,2 μm. Drsnost čištěné plochy laserem byla v případě nastavení parametrů 2, 3, 4 a 6 menší než původní drsnost povrchu.

Tabulka 32: Měření EDS (vzorek 19403-379)

Spectrum Label	Obsah prvků [hm. %]											
	C	N	O	Al	Si	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Mo	W
379 původní	4,77	21,26	-	-	-	-	35,18	38,80	-	-	-	-
379 1	4,26	18,96	5,95	4,40	0,61	-	22,22	42,90	-	0,70	-	-
379 2	4,69	20,50	4,23	3,59	0,49	0,10	13,41	45,12	-	7,89	-	-
379 3	9,09	-	2,82	-	-	-	2,13	4,36	-	71,68	3,97	5,95
379 4	7,78	-	2,67	0,14	-	-	1,60	3,83	0,30	74,02	3,75	5,90
379 5	7,71	-	2,34	-	-	-	1,57	3,82	0,31	74,11	4,05	6,09
379 6	7,91	-	2,62	-	-	-	1,62	3,88	-	74,04	3,89	6,04

Z měření EDS se prokázalo snížení obsahu N na 0 % s nastavenými parametry 3 až 6. Obsah V klesl na hodnotu 1,57 % s nastaveným parametrem 5. Obsah Cr klesl na hodnotu 3,82 % taktéž pro nastavený parametr 5.

7.5 Shrnutí výsledků experimentu

Tabulka 33: Výsledné parametry nejhodnějšího nastavení

	Výsledné parametry					
	Laser	Povlak	Tloušťka povlaku [μm]	Odebraná vrstva [μm]	Výkon [W]	Frekvence [kHz]
Vzorek 1	IPG	CrCN	≤ 15	19,780	50	50
Vzorek 2	IPG	CrCN	≤ 15	18,114	100	3
Vzorek 3	IPG	ALWIN	4,34	2,230	Nedošlo k odstranění vrstvy	
Vzorek 4	IPG	TRIPLE COATING Cr	≤ 15	1,321	5	3
Vzorek 5	OMRON	ALWIN	6,20	13,439	7,12	100
Vzorek 6	OMRON	VANADIN	5,24	23,719	7,12	100
Vzorek 7	OMRON	VANADIN	5,48	26,059	7,12	500
Vzorek 8	OMRON	CrCN	11,14	18,918	7,12	500
Vzorek 9	OMRON	TRIPLE COATING Cr	≤ 15	9,712	7,12	500
Vzorek 10	PERLA C	ALWIN	5,03	6,300	10	50
Vzorek 11	PERLA C	TRIPLE COATING Cr	≤ 15	2,500	10	50
Vzorek 12	PERLA C	VANADIN	5,48	8,900	10	50

	Výsledné parametry				
	Rychlost [mm.s ⁻¹]	Rozteč šrafování [mm]	Počet přejezdů	Drsnost Ra původní [μm]	Drsnost Ra po čištění laserem [μm]
Vzorek 1	500	0,05	60	0,325	0,910
Vzorek 2	500	0,05	60	0,212	0,916
Vzorek 3	Nedošlo k odstranění vrstvy				
Vzorek 4	500	0,05	60	0,070	0,427
Vzorek 5	400	0,004	20	0,111	0,423
Vzorek 6	400	0,004	30	0,196	7,529
Vzorek 7	400	0,004	20	0,175	1,437
Vzorek 8	400	0,004	15	0,117	0,759
Vzorek 9	400	0,004	12	0,034	0,442
Vzorek 10	1000	0,05	10	0,253	0,272
Vzorek 11	1000	0,04	5	0,133	0,117
Vzorek 12	1000	0,04	20	0,267	0,265

Tabulka 33 zobrazuje vzorky 1 – 12 a jejich vhodné nastavení pro odstranění povlaku z VBD. U některých vzorků docházelo k přetavování povrchu, se kterým souvisí i nárůst drsnosti povrchu. Nejvyšší nárůst drsnosti nastal v případě čištění OMRON laserem, menší nárůst drsnosti nastal u čištění IPG laseru, stejné či menší drsnosti oproti drsnosti původního povrchu bylo dosaženo u čištění PERLA C laserem.

EDS měření ukázalo, že docházelo vlivem částečného přetavování povrchu k odebrání větší tloušťky povlaku, než byla jeho skutečná tloušťka. V případě vzorku 3 při použití IPG laseru nedošlo k odstranění vrstvy povlaku CrCN na základním materiálu 19403. Nejvhodnější parametry u IPG laseru byly nastaveny pro vzorek 2 (povlak CrCN a základní materiál 19403). U OMRON laseru nejvhodnější parametry byly nastaveny u vzorků 7 (povlak VANADIN a základní materiál 19403) a 9 (povlak TRIPLE COATING Cr a základní materiál 19403). Pro laser PERLA C byly nejlépe zvolené parametry u vzorku 10 (povlak ALWIN a základní materiál 19403).

Vzhledem k porovnání nastavených parametrů dle druhu PVD povlaku byly ideální parametry k odstranění povlaku CrCN nastaveny pro vzorek 8 (základní materiál 19403). V případě odstranění tloušťky povlaku ALWIN se výsledky shodují u vzorků 5 (základní materiál 19403) a 10. Kvůli lepší dosažené drsnosti u vzorku 10, jsou tyto parametry nastavení vhodnější. Podobně tomu bylo u povlaku TRIPLE COATING Cr, vhodné nastavení bylo dosaženo u vzorku 9 (základní materiál 19403) a 11 (základní materiál 19308). Kvůli lepší dosažené drsnosti u vzorku 11, jsou tyto parametry nastavení vhodnější. Povlak VANADIN byl nejlépe odstraněn u vzorku 7, ale došlo k výraznému zhoršení výsledné drsnosti. Druhé nejlepší nastavení bylo u vzorku 12 (základní materiál 19403), ale bylo dosaženo stejné výsledné drsnosti.

8 Ekonomické zhodnocení

8.1 Náklady

K ekonomickému zhodnocení se přistupuje z pohledu vícekriteriálního hodnocení a hodnocení nákladů na očištění jednoho kusu. Tento způsob je zvolen proto, že není stanoveno přesné množství očišťovaných kusů. Odpisy nelze přesně stanovit, protože nejsou k dispozici veškeré údaje, např. životnost stroje.

Vícekriteriální hodnocení

Cena očištění nástroje se odvíjí od několika faktorů. Samotné zařízení je poměrně nákladné, především kvůli vysoké pořizovací ceně a provozních nákladů. Tabulka 34 znázorňuje pouze zadané hodnoty parametrů pro určení vícekriteriálního hodnocení čištění nástroje.

Tabulka 34: Základní parametry laserů

	IPG laser	OMRON laser	PERLA C laser
Pořizovací cena [Kč]	2 000 000	1 000 000	10 000 000
Provoz stroje [Kč/hod]	100	100	1 000
Cena za obsluhu [Kč/hod]	400	400	400
Maximální rychlost [mm.s ⁻¹]	7 000	700	2 000
Frekvence [kHz]	1-50	10-1 000	1-100
Výkon [W]	200	12	100
Délka pulsu [ns]	100-200	3	1 500
Velikost spotu [μm]	300	40	30
Dosahovaná drsnost Ra [μm]	0,8	2,118	0,218

K porovnání laserů se využije vícekriteriální hodnocení dle Tabulky 35. Váha kritéria je zvolena v rozmezí 1 – 10 (1 – nejméně, 10 – nejvíce), a každý z jednotlivých laserů bude hodnocen na základě jeho vlastností 1 – 5 (1 – nejhorší, 5 – nejlepší). Nejlépe hodnocený laser je ten, který má nejvyšší počet bodů.

Tabulka 35: Vícekriteriální hodnocení

	Váha kritéria	IPG laser	OMRON laser	PERLA C laser
Pořizovací cena [Kč]	10	4	5	1
Provoz stroje [Kč/hod]	7	5	5	1
Maximální rychlost [mm.s ⁻¹]	5	5	1	3
Výkon [W]	9	4	1	3
Dosahovaná drsnost Ra [μm]	8	2	1	5
Velikost spotu [μm]	4	5	3	2
Výsledky hodnocení		172	119	112

Nejlépe hodnoceným laserem dle vícekriteriálního hodnocení je IPG laser, kde jeho dominantní vlastností je výkon, přijatelná pořizovací cena a provozní náklady. PERLA C laser, který dosahuje nejlepších výsledků z pohledu výsledné drsnosti i odstranění povlaku, je nejhůře hodnocen.

Modelový příklad nákladů

Modelový příklad hodnocení nákladů na kus je stanoven pro případ volby stroje, pokud je známé množství kusů k očištění. Tento příklad zahrnuje i odpisy stanovené na 10 let.

Dle nejlepších výsledků pro lasery IPG, OMRON a PERLA C byly použity parametry pro výpočet doby čištění destičky jednoho kusu a počtu kusů očištěných destiček o Ø20 mm za hodinu, za směnu a za rok.

Tabulka 36: Počet očištěných destiček

	IPG laser	OMRON laser	PERLA C laser
Doba čištění	754 s	2357 s	63 s
Počet kusů za hodinu	4	1	57
Počet kusů za směnu	38	12	458
Počet kusů za rok	9587	3068	115108
Náklady laseru na hodinu	557 Kč	529 Kč	1686 Kč
Náklady na kus	140 Kč	529 Kč	30 Kč

Mezi náklady na hodinu jsou zahrnuty náklady na provoz, náklady na obsluhu, odpisy. Náklad na hodinu pro IPG laser je 557 Kč, pro OMRON laser je 529 Kč a pro laser PERLA C je 1686 Kč. Náklady na jeden kus očištěné destičky pro IPG laser je 140 Kč, pro OMRON laser 529 Kč a pro PERLA C laser 30 Kč. Při porovnání těchto údajů spolu s očištěnými kusy za hodinu má PERLA C nejnižší náklady na očištěný kus.

Při volbě laserového zařízení podle zmíněných hodnocení je rozhodující jeho využití. Pokud se za směnu očistí dostatečné množství kusů destiček, je výhodné zvolit laser PERLA C. Pokud slouží laser pro očištění destiček v řádech kusů, je dostačující volba IPG laseru.

9 Závěr

V teoretické části se popisuje princip laseru, jeho konstrukce a vlastnosti. Laser se dělí na dva základní druhy, a to na plynový a pevnolátkový. Laserová technologie má mnoho využití v průmyslu. Laserem je možné vrtat, svařovat, kalit, čistit povrchy apod. Mezi čištění povrchů se řadí i konvenční metody tryskání, omílání, čištění ultrazvukem a chemické čištění.

Základem čištění laserem je ablace, tedy odpařování materiálu z povrchu po ozáření laserovým paprskem, který je pulsní. Přičemž nedochází k velkému tepelnému ovlivnění základního materiálu. Tento způsob čištění lze použít na mnoho druhů materiálů, jako je kov, dřevo, kámen, sklo a další. S tím souvisí i různorodost odstraňovaných nečistot, které se mohou lišit podle použití materiálu. Příkladem je čištění a omašťování povrchu, odstraňování barev a povlaků, restaurování nebo čištění průmyslových forem.

Při experimentu byly použity 3 různé lasery (IPG laser, OMRON laser, PERLA C laser), byla testována jejich schopnost vyčistit povlak testovaných vzorků dle jejich parametrů (výkon, frekvence pulsů, rychlost skenování, rozteč šrafování, počet přejezdů, fokus) a vliv na kvalitu čištěné plochy. Pro zhodnocení kvality čištěného povrchu byla měřena hloubka odebraného materiálu, drsnost čištěného a původního materiálu.

Pro určení úspěšného odstranění povlaku bylo provedeno EDS měření pro zjištění materiálového složení čištěného a původního materiálu. Při procesu čištění bylo snahou dosáhnout stejné nebo lepší drsnosti čištěného povrchu oproti původnímu.

Vliv na přetavování povrchu, který souvisí s větší tloušťkou odebrané vrstvy, byl maximální u IPG laseru, menší u OMRON laseru a minimální u PERLA C laseru. Vliv způsobila délka pulsu, čím kratší puls, tím menší přetavování povrchu.

Nejlepší drsnosti povrchu Ra 0,117 μm dosáhl laser PERLA C pro základní materiál 19308. Tento laser dosahoval nejlepších celkových výsledků při odstraňování povlaku. Parametry laseru byly nastaveny na výkon 10 W, frekvenci 50 kHz, rychlost 1000 $\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$, šrafování 0,04 mm a fokus 2 mm. Při tomto nastavení klesly hodnoty obsahu N, Si a Ti na 0 %. Nejnižší obsah Cr dosahoval hodnot 3,79 %.

Z vícekritériálního hodnocení je výhodné použít laser IPG. V experimentu odstranil nejlépe vrstvu CrCN. Nejnižší hodnoty obsahu dosáhl N 0 %, dále Cr klesl na hodnotu

3,09 % a nakonec C klesl na 6,24 %. Z pohledu odstraněné vrstvy povlaku je nastavení parametrů laseru (výkon 100 W, frekvence 3 kHz, rychlost $500 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$, rozteč šrafování 0,05 mm) neuspokojivé i kvůli vyšší drsnosti povrchu $R_a 0,916 \mu\text{m}$ základního materiálu 19403. Pro dosažení lepších výsledků by bylo potřeba pozměnit nastavené parametry. Toto by bylo možné provést v dalším experimentu, kde by se pozměnilo nastavení rychlosti a frekvence na vyšší hodnoty a provedlo by se opětovné hodnocení dosažených výsledků. Z pohledu nákladu na očištěný kus je ekonomicky výhodné použít laser PERLA C.

Cílem této práce bylo zjistit vhodné nastavení parametrů laseru k odstranění vrstvy povlaku a ovlivnit co nejméně základní materiál destiček. Tyto stanovené cíle byly splněny.

10 Literatura

- [1] KOŘÁN, Pavel. *Seriál na téma lasery: Základní princip laseru a jejich dělení*. In: Lasery a optika: SERIÁL NA TÉMA LASERY [online]. [cit. 21.07.2022]. Praha: LAO - průmyslové systémy, 2013. Dostupné z: <http://www.lao.cz/lao-info-49/serial-na-tema-lasery---zakladni-princip-laseru-a-jejich-deleni-127>
- [2] ION, John. (2005). *Laser Processing of Engineering Materials - Principles, Procedure and Industrial Application - 3.2 Generation of Laser Light*. Elsevier. Retrieved from <https://app.knovel.com/hotlink/pdf/id:kt00BJOBBJ/laser-processing-engineering/generation-laser-light>
- [3] Laser Construction. *Electronics Tutorial, Basic Physics, Online Tests, Computer Basics, Concepts of Physics* [online]. Copyright © 2013 [cit. 26.07.2022]. Dostupné z: <http://www.physics-and-radio-electronics.com/physics/laser/laserconstruction.html>
- [4] MRŇA, Libor. *Základy laserové techniky* [online]. In: . Brno: Ústav strojírenské technologie, 2013 [cit. 21.07.2022]. Dostupné z: https://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/img/opory/hsv_specialni_metody_svarovani_zaklady_laserove_techiky_2013_mrna.pdf
- [5] *Vyznáte se v laserové terminologii a jejích úskalích?* - oneindustry – průmyslový portál, výroba a technologie. oneindustry – průmyslový portál: strojírenství, obrábění, nástrojárna, automotive, plasty, elektro, automatizace, roboty, Průmysl 4.0, výroba, technologie. [online]. Copyright © 2021 INFOCUBE s.r.o. [cit. 26.07.2022]. Dostupné z: <https://www.oneindustry.cz/elektro/vyznate-se-v-laserove-terminologii-a-jejich-uskalich/>
- [6] Laser: *Kontinuální a pulzní režimy provozu*. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 26.07.2022]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Laser#Continuous-wave_operation
- [7] *Seriál na téma lasery - Hlavní typy laserů používaných v průmyslu* > LAO - lasery a optika. LAO - lasery a optika [online]. [cit. 21.07.2022]. Dostupné z: <http://www.lao.cz/lao-info-49/serial-na-tema-lasery---hlavni-typy-laseru-pouzivanych-v-prumyslu>
- [8] *Průmyslové lasery (4) - Hlavní typy laserů v průmyslové praxi* | MM Průmyslové spektrum. MM Průmyslové spektrum - nejčtenější strojírenský časopis a jeho digitální obsah | MM Průmyslové spektrum [online]. [cit. 26.07.2022]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/prumyslove-lasery-4-hlavni-typy-laseru-v-prum>
- [9] *Vrtání* | TRUMPF. [online]. [cit. 22.07.2022]. Dostupné z: https://www.trumpf.com/cs_CZ/reseni/pouziti/laserove-rezani/vrtani/

- [10] Laserové vrtání - Narran. Vyrábíme a distribuujeme špičkové laserové technologie - Narran [online]. [cit. 21.07.2022]. Dostupné z: <https://narran.cz/aplikace-laseru/laserove-vrtani>
- [11] LAPŠANSKÁ, Hana. *Laserové technologie v praxi* [online]. [cit. 22.07.2022]. Dostupné z: <https://adoc.pub/laserove-technologie-v-praxi.html>
- [12] MRŇA, Libor. *Technologie využívající laser* [online]. [cit. 22.07.2022]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/img/opory/hsv_specialni_metody_svarovani_sv_arovani_laserem_2013_mrna.pdf
- [13] *Laserové povrchové kalení oceli* – LaserTherm. Lasery pro průmyslové technologie, laserové systémy – LaserTherm. [cit. 23.07.2022]. Dostupné z: <https://www.lasertherm.cz/technologie/svarovani-navarovani-kaleni-laserem/laserove-kaleni>
- [14] ZELENÝ, Petr a Adam LUKE. *3D tištěná versus obráběná?*. MM Průmyslové spektrum [online]. [cit. 23.07.2022]. ISSN 1212-2572. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/3d-tistena-versus-obrabena>
- [15] *Omílání jako univerzální metoda pro úpravu povrchů*. MM Průmyslové spektrum [online]. 16.5.2002, 32-33 [cit. 22.07.2022]. ISSN 1212-2572
- [16] *Laserové navařování* [online]. 2001(4), 67 [cit. 24.07.2022]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/laserove-navarovani>
- [17] OTEC Präzisionsfinish: *Stroje pro procesy omílání* [online]. [cit. 22.07.2022]. Dostupné z: <https://www.otec.de/cz/produkty/omilani/>
- [18] BÁČOVÁ, Radka. *Dokonalé povrchy řezných nástrojů*. MM Průmyslové spektrum [online]. 10.5.2017, 72-73 [cit. 22.07.2022]. ISSN 1212-2572.
- [19] KREIBICH, Viktor. *Teorie a technologie povrchových úprav*. Praha: České vysoké učení technické, 1996. ISBN 80-01-01472-X.
- [20] PROCHÁZKA, Jiří. *Technologie slévání, tváření a svařování*. Dotisk. Praha: ČVUT, 1984.
- [21] Wheelabrator. *Tryskací zařízení* [online]. [cit. 23.07.2022]. Dostupné z: <https://www.wheelabratorgroup.com/cs-cz/equipment>
- [22] Manufacturingguide.com: *Wheel blasting* | Find suppliers, processes & material. [online]. [cit. 21.07.2022]. Dostupné z: <https://www.manufacturingguide.com/en/wheel-blasting>
- [23] FRENIER, W. *Technology for Chemical Cleaning of Industrial Equipment* (2nd Edition) [online]. NACE International, 2018 [cit. 23.07.2022]. ISBN 978-1-5231-3061- 0. Dostupné z: <https://app.knovel.com/hotlink/pdf/id:kt0127XP82/technologychemical-cleaning/chelating-agents>
- [24] MOHYLA, Miroslav. *Technologie povrchových úprav kovů*. Ostrava: VŠB, 1995. : il. ISBN 80-7078-267-6.
- [25] TÁBORSKÝ, Pavel. *Problematika lakování povrchu kovových součástí*. Brno, 2018. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně.
- [26] *Lasery pro čištění* – LASCAM systems. LASCAM systems – průmyslové laserové a kamerové systémy [online]. [cit. 25.07.2022]. Dostupné z: <https://www.lascam.cz/lasery-pro-cisteni/>

- [27] *O čištění* - Laserové čištění. Laserové čištění [online]. Laserové čištění 2018 [cit. 25.07.2022]. Dostupné z: <http://laserove-cisteni.cz/o-cisteni/>
- [28] EASON, Robert. *Pulsed Laser Deposition of Thin Films: Applications-Led Growth of Functional Materials*. John Wiley, 2006. ISBN 9780470052129.
- [29] Čištění laserem | LRSERVICES.CZ. *Čištění laserem* | LRSERVICES.CZ [online]. [cit. 21.07.2022]. Dostupné z: <https://lrservices.cz/>
- [30] *Příprava povrchu* - Narran. Vyrábíme a distribuujeme špičkové laserové technologie - Narran [online]. [cit. 21.07.2022]. Dostupné z: <https://narran.cz/priprava-povrchu/>
- [31] *Odstraňování barev – odlakování* - Narran. Vyrábíme a distribuujeme špičkové laserové technologie - Narran [online]. [cit. 21.07.2022]. Dostupné z: <https://narran.cz/odstranovani-barev-odlakovani/>
- [32] *Čištění průmyslových forem laserem* - Narran. Vyrábíme a distribuujeme špičkové laserové technologie - Narran [online]. [cit. 21.07.2022]. Dostupné z: <https://narran.cz/cisteni-forem/>
- [33] ĎOUBAL, Jakub. *Kamenné památky Kutné Hory: Restaurování a péče o sochařská díla*. Pardubice: H.R.G. tiskárna, Litomyšl, 2015. ISBN 978-80-7395-906-7.
- [34] *Srovnání čištění laserem s dalšími metodami čištění na silikátových pískovcích* - PDF Stažení zdarma. Představujeme Vám pohodlné a bezplatné nástroje pro publikování a sdílení informací. [online]. [cit. 20.07.2022]. Dostupné z: <https://docplayer.cz/37543983-Srovnani-cisteni-laserem-s-dalsimi-metodami-cisteni-na-silikatovych-piskovcich.html>
- [35] LASCAMS: systems [online]. [cit. 23.07.2022]. Dostupné z: <http://www.lascam.cz/>
- [36] *Tabulka srovnání metod čištění* - LASCAM systems. [online]. Copyright © LASCAM systems s.r.o. [cit. 23.07.2022]. Dostupné z: <https://www.lascam.cz/systemy-pro-laserove-cisteni/tabulka-cisteni/>
- [37] *Ochrana zdraví při práci s lasery* | BOZPinfo.cz. BOZPinfo - Časopis JOSRA [online]. [cit. 19.07.2022]. Dostupné z: <https://www.bozpinfo.cz/ochrana-zdravi-pri-praci-s-lasery?page=0%2C2>
- [38] *Bezpečnost laseru Třídy 1 až 4* - Leonardo technology s.r.o. - Automatizace průmyslového značení. *Leonardo technology s.r.o.* - Automatizace průmyslového značení [online]. [cit. 19.07.2022]. Dostupné z: <https://www.lt.cz/e-learning/laser/bezpecnost-laseru-tridy-1-az-4>
- [39] *Provozní řády a směrnice* (smernice.WebHome) [online]. [cit. 20.07.2022]. Dostupné z: <https://idoc.vsb.cz/xwiki/bin/view/smernice/>
- [40] *Ochranné pomůcky* > LAO - Lasery a Optika. LAO - lasery a optika [online]. [cit. 21.07.2022]. Dostupné z: <http://www.lao.cz/ochranne-pomucky-168k>
- [41] *Nástroje a nářadí Velešín - Výroba a servis obráběcích nástrojů* [online]. [cit. 21.07.2022]. Dostupné z: <https://navel.cz/wp-content/uploads/2019/10/Katalog-povlaky-n%C3%A1stroj%C5%AF-Navel-CZ.pdf>

11 Seznam obrázků

Obrázek 1: Princip vzniku stimulované emise [1].....	12
Obrázek 2: Schéma optického rezonátoru [11].....	14
Obrázek 3: Srovnání emise záření běžného tepelného zdroje a laseru [11]	15
Obrázek 4: Světelné spektrum [4]	15
Obrázek 5: Závislost absorpce na vlnové délce [4]	16
Obrázek 6: RF DC CO ₂ laser [8]	20
Obrázek 7: Nd: YAG, diskový, vláknový a diodový laser [8]	21
Obrázek 8: LPSS Nd: YAG laser [8].....	21
Obrázek 9: Diodami buzený Nd: YAG laser (DPSS) [8]	22
Obrázek 10: Vláknový laser [8].....	23
Obrázek 11: Schéma diodového laseru [8]	23
Obrázek 12: Schéma laserového vrtání [11].....	24
Obrázek 13: Režimy vrtání laserem [9].....	25
Obrázek 14: Schéma laserového řezání [11]	26
Obrázek 15: Techniky svařování laserem [11]	27
Obrázek 16: Schéma metacího kola [22].....	32
Obrázek 17: Ochranné štítky [38].....	39
Obrázek 18: Ochranné brýle [40]	41
Obrázek 19: IPL ochranné brýle [40]	41
Obrázek 20: Laserové okno [40]	42
Obrázek 21: Vzorek 19403-122; počet přejezdů 1-60x.....	44
Obrázek 22: Čištěný povrch, vzorek 19403-122 (mikroskop, přejezd 1x-8x)	45
Obrázek 23: Čištěný povrch, vzorek 19403-122 (mikroskop, přejezd 9x-60x)	45
Obrázek 24: Vzorek 19403-273; počet přejezdů 1-60x.....	47
Obrázek 25: Čištěný povrch, vzorek 19403-273 (mikroskop, přejezd 1x-8x)	47
Obrázek 26: Čištěný povrch, vzorek 19403-273 (mikroskop, přejezd 9x-60x).....	48
Obrázek 27: Vzorek 19403-349; počet přejezdů 1-60x.....	49
Obrázek 28: Čištěný povrch, vzorek 19403-349 (mikroskop, přejezd 1x-8x)	50
Obrázek 29: Čištěný povrch, vzorek 19403-349 (mikroskop, přejezd 9x-60x)	50
Obrázek 30: Vzorek 19308-355; počet přejezdů 1-60x.....	52
Obrázek 31: Čištěný povrch, vzorek 19308-355 (mikroskop, přejezd 1x-8x)	52
Obrázek 32: Čištěný povrch, vzorek 19308-355 (mikroskop, přejezd 9x-60x)	52
Obrázek 33: Vzorek 19403-364; počet přejezdů 1-30x.....	54
Obrázek 34: Čištěný povrch, vzorek 19403-364 (mikroskop, přejezd 1x-9x)	54
Obrázek 35: Čištěný povrch, vzorek 19403-364 (mikroskop, přejezd 10x-30x)	54
Obrázek 36: Vzorek 19403-23; počet přejezdů 1-30x.....	56
Obrázek 37: Čištěný povrch, vzorek 19403-23 (mikroskop, přejezd 1x-30x)	56
Obrázek 38: Vzorek 19403-379; počet přejezdů 1-30x.....	58
Obrázek 39: Čištěný povrch, vzorek 19403-379 (mikroskop, přejezd 1x-30x)	58
Obrázek 40: Vzorek 19403-330; počet přejezdů 1-30x.....	59
Obrázek 41: Čištěný povrch, vzorek 19403-330 (mikroskop, přejezd 1x-30x, parametry 1).....	60
Obrázek 42: Čištěný povrch, vzorek 19403-330 (mikroskop, přejezd 1x-30x, parametry 2).....	60
Obrázek 43: Vzorek 19403-354; počet přejezdů 1-30x.....	62
Obrázek 44: Čištěný povrch, vzorek 19403-354 (mikroskop, přejezd 1x-30x, parametry 1).....	63

Obrázek 45: Čištěný povrch, vzorek 19403-354 (mikroskop, přejezd 1x-30x, parametry 2)	63
Obrázek 46: Vzorek 19403-73.....	65
Obrázek 47: Čištěný povrch, vzorek 19403-73 (mikroskop)	66
Obrázek 48: Čištěný povrch, vzorek 19403-73 (mikroskop)	66
Obrázek 49: Vzorek 19308-356.....	68
Obrázek 50: Čištěný povrch, vzorek 19308-356 (mikroskop)	68
Obrázek 51: Čištěný povrch, vzorek 19308-356 (mikroskop)	68
Obrázek 52: Vzorek 19403-379.....	70
Obrázek 53: Čištěný povrch, vzorek 19403-379 (mikroskop)	70

12 Seznam tabulek

Tabulka 1: Základní přehled průmyslových laserů [7].....	19
Tabulka 2: Srovnání svařovacích metod [12].....	27
Tabulka 3: Porovnání technologií navařování [16].....	29
Tabulka 4: Srovnání metod čištění [36].....	38
Tabulka 5: Porovnání použitých laserů.....	43
Tabulka 6: Měření hloubky úběru a drsnosti povrchu (vzorek 19403-122).....	46
Tabulka 7: Měření EDS (vzorek 19403-122).....	46
Tabulka 8: Měření hloubky úběru a drsnosti povrchu (vzorek 19403-273).....	48
Tabulka 9: Měření EDS (vzorek 19403-273).....	49
Tabulka 10: Měření hloubky úběru a drsnosti povrchu (vzorek 19403-349).....	51
Tabulka 11: Měření EDS (vzorek 19403-349).....	51
Tabulka 12: Měření hloubky úběru a drsnosti povrchu (vzorek 19308-355).....	53
Tabulka 13: Měření EDS (vzorek 19308-355).....	53
Tabulka 14: Měření hloubky úběru a drsnosti povrchu (vzorek 19403-364).....	55
Tabulka 15: Měření EDS (vzorek 19403-364).....	55
Tabulka 16: Měření hloubky úběru a drsnosti povrchu (vzorek 19403-23).....	57
Tabulka 17: Měření EDS (vzorek 19403-23).....	57
Tabulka 18: Měření hloubky úběru a drsnosti povrchu (vzorek 19403-379).....	58
Tabulka 19: Měření EDS (vzorek 19403-379).....	59
Tabulka 20: Měření hloubky úběru a drsnosti povrchu (vzorek 19403-330).....	61
Tabulka 21: Měření EDS (vzorek 19403-330).....	61
Tabulka 22: Měření hloubky úběru a drsnosti povrchu (vzorek 19403-354).....	64
Tabulka 23: Měření EDS (vzorek 19403-354).....	64
Tabulka 24: Rozpis nastavení parametrů čištěných čtverců (vzorek 19403-73).....	65
Tabulka 25: Měření hloubky úběru a drsnosti povrchu (vzorek 19403-73).....	66
Tabulka 26: Měření EDS (vzorek 19403-73).....	67
Tabulka 27: Rozpis nastavení parametrů čištěných čtverců (vzorek 19308-356).....	67
Tabulka 28: Měření hloubky úběru a drsnosti povrchu (vzorek 19308-356).....	69
Tabulka 29: Měření EDS (vzorek 19308-356).....	69
Tabulka 30: Rozpis nastavení parametrů čištěných čtverců (vzorek 19403-379).....	70
Tabulka 31: Měření hloubky úběru a drsnosti povrchu (vzorek 19403-379).....	71
Tabulka 32: Měření EDS (vzorek 19403-379).....	71
Tabulka 33: Výsledné parametry nejvhodnějšího nastavení.....	72
Tabulka 34: Základní parametry laserů.....	74
Tabulka 35: Vícekriteriální hodnocení.....	75
Tabulka 36: Počet očištěných destiček.....	75