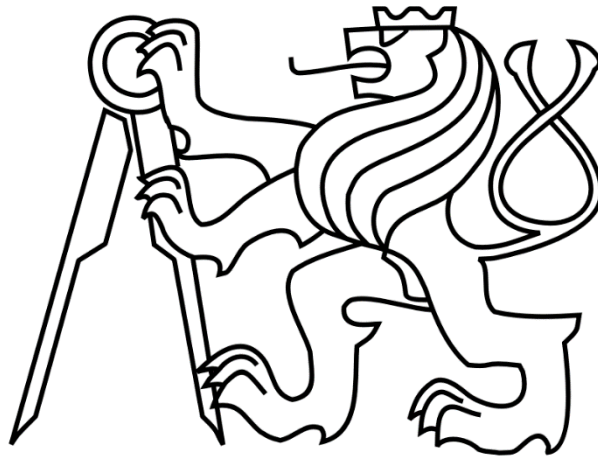


ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ

Ústav výrobních strojů a zařízení



Bakalářská práce

Technologie odstraňování ochranných povlaků rezných nástrojů laserem

2019

Josef Hlavinka

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Hlavinka** Jméno: **Josef** Osobní číslo: **466408**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávací katedra/ústav: **Ústav výrobních strojů a zařízení**
Studijní program: **Teoretický základ strojního inženýrství**
Studijní obor: **bez oboru**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Technologie odstraňování ochranných povlaků řezných nástrojů laserem

Název bakalářské práce anglicky:

Laser stripping of protective coatings for cutting tools

Pokyny pro vypracování:

V rámci práce budou definovány možnosti technologie odstraňování vybraných ochranných povlaků nanášených na řezné nástroje, případně formy. Práce bude rozdělena na teoretickou část s popisem problematiky a na vlastní experiment. Výsledky budou základem dalšího výzkumu; Osnova: Popis principu laseru, čištění laserem a vhodné typy laserových zařízení, řezné nástroje a povlaky, technologie odstraňování povlaků laserem, vlastní experiment odstraňování povlaku laserem, analýza dosažených výsledků; rozsah textové části 40-60 stran.

Seznam doporučené literatury:

VRBOVÁ, M., JELÍNKOVÁ, H., GAVRILOV, P. Úvod do laserové techniky. ČVUT, Praha, 1994. 233 s. ISBN 80-01-01108-9.; LIA handbook of laser materials processing. Editor John F. READY. Toledo, Ohio: LIA, 2001. 717 s. ISBN 0-912035-15-3.; WATKINS, K.G., CURRAN, C., LEE, Jong-Myung. Two new mechanisms for laser cleaning using Nd:YAG sources. Elsevier [online]. April 2003 [cit. 2006-02-10]. Dostupný na <http://www.lasers.org.uk/Liv/papers/cleaning11.html>; LEE, J.M., WATKINS, K.G.. Removal of small particles on silicon wafer by laser-induced airborne plasma shock Wales. Journal of Applied Physics [online]. June 2001 [cit. 2006-02-10]. Dostupný na <http://www.lasers.org.uk/Liv/papers/cleaning7.html>; CURRAN, C., WATKINS, K.G.; LEE, J.M. Effect of wavelength and incident in the laser removal of particles from silicon wafers. 20th International Congress on Applications of Lasers and Electro-Optics [online] October 2-5, 2001 [cit. 2006-02-10]. Dostupný na <http://www.lasers.org.uk/Liv/papers/cleaning10.html>.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

Ing. Pavel Zeman, Ph.D., ústav výrobních strojů a zařízení FS

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

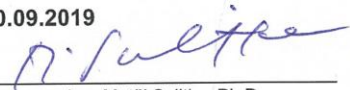
Ing. Jan Brajer, Ph.D., ústav výrobních strojů a zařízení FS

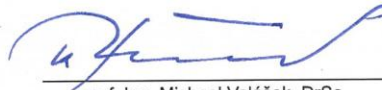
Datum zadání bakalářské práce: **30.04.2019**

Termín odevzdání bakalářské práce: **21.07.2019**

Platnost zadání bakalářské práce: **30.09.2019**

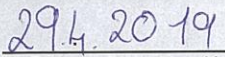

Ing. Pavel Zeman, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

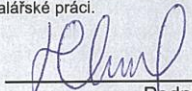

Ing. Matěj Sulitka, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry


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

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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


Datum převzetí zadání


Podpis studenta

Prohlášení

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

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

V Praze dne

.....

podpis

Poděkování

Rád bych poděkoval Ing. Pavlu Zemanovi, Ph.D. za podstatné rady a připomínky, za vedení této práce a za možnost prostudovat tak zajímavé téma. Dále mé díky patří Ing. Janu Brajerovi, Ph.D. za konzultace. Také bych rád poděkoval Bc. Tomášovi Primusovi za pomoc při programování laserového zařízení, a Ing. Martinu Daňkovi za pomoc při měření na 3D profiloměru. Nakonec děkuji svým rodičům za duševní a materiální podporu při studiu.

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

Anotace

Autor:	Josef Hlavinka
Název BP:	Technologie odstraňování ochranných řezných povlaků z řezných nástrojů laserem
Rozsah práce:	80 stran, 66 obrázků, 11 tabulek
Akademický rok vyhotovení:	2018/2019
Škola:	ČVUT v Praze, Fakulta strojní
Ústav:	Ú121315 – Ústav výrobních strojů a zařízení
Vedoucí bakalářské práce:	Ing. Pavel Zeman, PhD.
Konzultant:	Ing. Jan Brajer, Ph.D.
Zadavatel:	
Využití:	Zefektivnění odstraňování ochranných povlaků
Klíčová slova:	Laser, laserové čištění, ochranné povlaky, laser stripping
Anotace:	Práce se zabývá odstraňováním ochranných povlaků řezných nástrojů laserem. V teoretické části jsou popsány metody odstraňování povlaků. Experimentální část obsahuje návrh zpracování experimentu, který spočívá ve vypálení určité plochy laserem do povlaku a zhodnocení kvality povrchu a doby k tomu potřebné.

Annotation

Author:	Josef Hlavinka
Title of bachelor thesis:	Laser stripping of protective coatings for cutting tools
Extent:	80 pages, 66 pictures, 11 tables
Academic year:	2018/2019
University:	CTU in Prague, Faculty of Mechanical Engineering
Department:	Ú121315 – The Department of Production machines and Equipment
Supervisor:	Ing. Pavel Zeman, PhD.
Consultant:	Ing. Jan Brajer, Ph.D.
Submitter:	
Application:	Effectivization of protective rating stripping
Key words:	Laser, laser cleaning, protective coatings, laser stripping
Annotation:	This thesis pursues the idea of cutting tool protective coating removal with laser. In theoretical part, protective coating and their deposition methods are described, as well as methods of coating removal. Experimental part contains suggestion and processing of experiment, which consists of lasing of certain area of coating and evaluation of quality of surface and time needed to do so.

Obsah

Poděkování	4
Anotace	5
Annotation	6
Úvod.....	11
1.Laser a laserové technologie	12
1.1 Laser a laserový zdroj.....	12
1.2 Typy laserů	13
1.2.1 Pevnolátkové lasery	13
1.2.2 Plynové lasery.....	14
1.3 Laserové technologie.....	14
1.4 Laserová bezpečnost.....	16
2 Řezné nástroje	18
2.1 Nosný materiál	18
2.1.1 Slinutý karbid.....	18
2.2 Povlaky.....	20
2.2.1 Nanášení povrchových vrstev metodou PVD	21
2.2.2 Nanášení povrchových vrstev metodou CVD	21
3 Odstraňování povlaků	23
3.1 Mechanické	23
3.2 Chemické odstraňování povlaků.....	24
3.3 Elektrochemické odstraňování povlaků	25
3.4 Fyzikální odstraňování povlaků.....	26
4 Odstraňování povlaku laserem.....	27
4.1 Laserové čištění.....	27
4.2 Stripping	29
4.3 Sledované parametry laserového odstraňování povlaků	32
4.4 Nežádoucí efekty laserového odstraňování povlaků	37
4.5 Porovnání metod odstraňování povlaků	39
5 Experiment	42
5.1 Popis experimentu.....	42
5.2 Test na povlaku HPX Booster.....	43
5.2.1 Analýza testů na povlaku HPX Booster	56



5.3	Test na povlaku DLC C	57
5.3.1	Analýza testů na povlaku DLC C	69
6	Závěr	71
	Seznam použité literatury	73
	Seznam obrázků	77
	Seznam tabulek	79
	Seznam elektronických příloh	80



Seznam použitých zkratk a označení

označení	jednotka	popis
a-C:H		Amorfní uhlíková vrstva
Al ₂ O ₃		Oxid hlinitý, používaný pro řeznou keramiku
AlTiN		Hliníkovo-titanovo-dusíkový materiál používaný na povlaky
CO ₂		Oxid uhličitý
CVD		Chemical vapour deposition, Chemická depozice z plynné fáze
d	[mm]	Průměr laserového svazku
DLC		Diamod-like carbon, Uhlíková struktura podobná diamantu
fp	[Hz]	Frekvence pulsu
F	[J·cm ⁻²]	Plošná hustota energie, Fluence
H	[%]	Boční překryv pulsů (v ose y)
H ₂ O ₂		Peroxid vodíku
HNO ₃		Kyselina dusičná
HSS		High speed steel, viz RO
λ	[nm]	Vlnová délka
IT		Stupeň přesnosti
KNB		Kubický nitrid boru
KOH		Hydroxid draselný
KrF		Fluorid kryptonu
NaOH		Hydroxid sodný
NbC		Karbid niobu
Nd:YAG		Yttrium Aluminium Granát (Y ₃ Al ₅ O ₁₂) dopovaný ionty neodymu (Nd ³⁺)
Nd:YVO ₄		Yttrium Vanadát (YVO ₄) dopovaný ionty neodymu (Nd ₃₊)
O ₂		molekula kyslíku
P	[W]	Průměrný výkon
Pš	[W]	Špičkový výkon



Physical vapour deposition, fyzikální depozice z plynné fáze

PVD		
Ra	[μm]	Střední aritmetická výška profilu
RO		Rychlořezná ocel
Rz	[μm]	Největší výška profilu
Sa	[μm]	Průměrná aritmetická výška profilu plochy
SD		Syntetický diamant
Si ₃ N ₄		Nitrid křemičitý, používaný pro řeznou keramiku
SK		Slinutý karbid
Sp	[%]	Překrytí pulsů
TaC		Karbid tantalu
TiC		Karbid titanu
TiN		Nitrid titanu
Tp	[ns],[ps]	Délka pulsu
vf	[mm/s]	Rychlost rozmítání paprsku
WC		Karbid wolframu
XeO		Oxid xenonu

Úvod

Technologie obrábění je významným odvětvím strojírenství. Velké množství součástí je vytvářeno právě obráběním. Obráběcí proces se neustále vyvíjí a zdokonaluje. Řezné nástroje jsou kontinuálně vyvíjeny a zdokonalovány. Kvalitnější obrobky vyžadují lepší nástroje. S kvalitou ale roste i cena. Snažíme se zdokonalovat nejen nástroje, ale také technologii k jejich výrobě či případné renovaci. Odolnost a kvalitu nástrojů lze také zlepšit pomocí nanášení ochranného povlaku na základní materiál nástroje. Výrazně se tím prodlouží životnost nástroje. V této práci je popsán postup pro návrh technologie odstraňování pevných povlaků z řezných nástrojů laserem.

V současné době se k obrábění běžně používají vyměnitelné břitové destičky ze slinutého karbidu připevněné na držáku z oceli. Používají se také jednokusové, tzv. monolitické nástroje z oceli nebo slinutého karbidu. Slinutý karbid je tvrdý a křehký materiál. Proto se používá pro monolitické nástroje malých rozměrů nebo na výrobu břitových destiček. Pro zlepšení jeho řezných vlastností se na povrch karbidu nanáší tvrdý povlak. Ovšem materiál povlaku i ten základový se během procesu obrábění opotřebovává. Zničené břitové destičky se zpravidla likvidují a nahrazují novými. Poškozené monolitní nástroje větších rozměrů je ekonomicky výhodnější několikrát opravit (přebrousit, regenerovat) než kupovat celý nový nástroj. Tvrdý povlak se však musí z nástroje odstranit. Zavedené metody odstraňování povlaků jsou sice účinné, ale nedostačující z hlediska kvality ošetřeného povrchu, vzniklého odpadu, doby odstraňování či kombinace předchozích. Proto se hledá způsob, kterým by bylo povlak možné odstranit rychle, levně a s vysokou kvalitou ošetřeného povrchu.

Rozvíjející se metodou je odstraňování povlaků pomocí laseru. Oproti běžným způsobům má tato metoda značné výhody, např. vysokou rychlost. V této práci je metoda odstraňování povlaku z řezných nástrojů laserem popsána. Jsou navrženy a otestovány parametry laseru pro odstranění požadovaných materiálů s ohledem na produktivitu a jakost procesu.

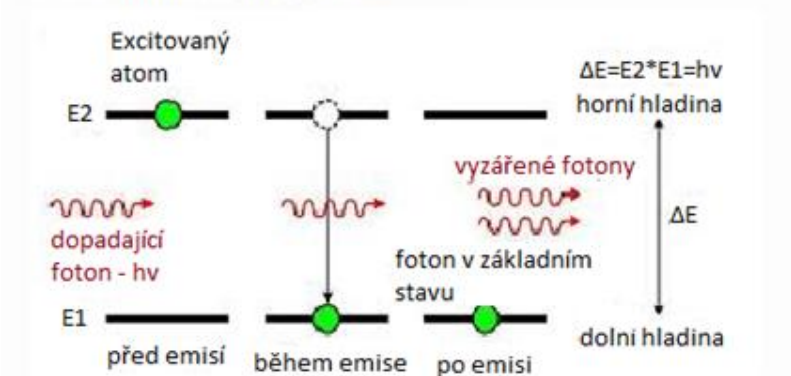
1. Laser a laserové technologie

1.1 Laser a laserový zdroj

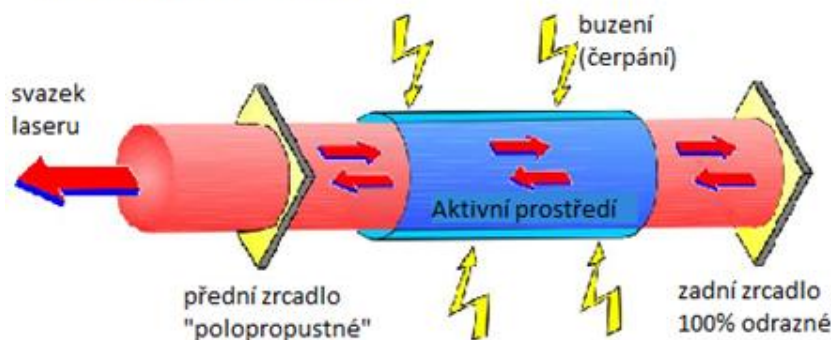
Laser je zdroj světelného paprsku. Samotné slovo je akronym pro Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation, tedy zesílení světla povzbuzené emisí radiace. Laser je tedy zařízení, které pomocí stimulace emise fotonů produkuje úzký paprsek o specifické vlnové délce (monochromatický), stálý v čase (koherentní) a nerozbíhající se (kolimovaný), který se šíří především v jednom směru. Proto je možné paprsek soustředit pomocí soustavy čoček a zrcadel na malý bod [1].

Fotony, které tvoří paprsek, vznikají v médiu (také označováno jako pumpa či aktivní prostředí). To je uloženo mezi zcela odrazivým a polopropustným zrcadlem. Buzením (dodáváním energie do média optickým či jiným zářením (radiace), elektrickou energií, atd.) se elektrony média dostanou do excitovaného stavu. Tam elektrony zůstanou velmi krátkou dobu a pak přejdou opět na svou základní vrstvu. Během toho vyzáří kvantum přebytečné energie ve formě fotonu. Fotony se odrážejí mezi dvěma zrcadly, tím způsobují další excitaci a vyzařování (lavinový efekt). Poté se proud fotonů dostane přes polopropustné zrcadlo ve formě paprsku (viz Obr. 1) [1] [12].

Princip stimulované emise



Základní schéma laseru



Obr. 2 Schéma principu laseru [12]

Laser může fungovat ve dvou nastaveních. Kontinuální vlna paprsku je neměnné vyzařování o stále stejném výkonu. Pulsující laser vyzařuje paprsky v krátkých (ms, až ps, fs) časových úsecích, ovšem je možné dosáhnout několikanásobného okamžitého výkonu [1].

1.2 Typy laserů

Lasery prošly dlouhým a složitým vývojem. Existuje mnoho druhů laserů a každý je vhodný pro jinou technologii. Liší se převážně médiem, ve kterém se excitují elektrony. S tím souvisí také vlnová délka paprsku. Dále je rozdíl ve způsobu, jakým se přivádí energie do média. V této kapitole budou uvedeny pouze ty lasery, které jsou vhodné pro technologii odstraňování povlaků laserem [1].

1.2.1 Pevnolátkové lasery

Nd:YAG laser – využívá krystal Yttrium Aluminium Granátu ($Y_3Al_5O_{12}$) dopovaný ionty neodymu (Nd^{3+}). Má velice široké využití. Běžně se používá

k řezání, svařování a vrtání. Také se používá k měření vzdálenosti, operacím očí, úpravám chrupu a občas k čerpání jiných laserů. Může pracovat v kontinuálním i pulsním nastavení. Kontinuální Nd:YAG laser má výkon v řádu stovek W, pulsní může při délce pulsu 100 ns dosáhnout špičkového výkonu tisíců W. Účinnost je však poměrně malá, okolo 5% [16]. Základní vlnová délka Nd:YAG laseru je 1064 nm. Pro odstraňování tvrdých povlaků je vhodnější druhá, třetí a někdy i čtvrtá harmonická frekvence (tedy 532 nm, 355 nm, 248 nm) [9]. Tento laser může být čerpán diodou či halogenovou výbojkou [9] [16].

Nd:YVO₄ laser – pracuje na podobném principu jako předchozí laser. Dopovaný krystal je však Yttrium Vanadát a má také vlnovou délku 1064 nm. Používá se pro technologie řezání a svařování. Pro odstraňování tvrdých povlaků se používá druhá harmonická frekvence (532 nm). Tento typ pevnolátkového laseru má menší výkon, než Nd: YAG, řádově desítky W [17].

1.2.2 Plynové lasery

U převážné většiny plynových laserů se excitace provádí pomocí elektrického výboje [1].

Excimerový laser – zkratka z excited dimer – aktivní prostředí obsahuje molekuly složené z vzácného plynu a halogenu. Může se vyskytnout i laser s molekulami oxidů vzácných plynů. Produkuje UV paprsek o vlnové délce od 190 nm do 350 nm (v závislosti na konkrétním vzácném plynu v molekule). Častým zástupcem je KrF laser s délkou vlny 248 nm, známý je i XeO. Používá se v medicíně, při výrobě polovodičových součástek a při mikroobrábění [8][16].

1.3 Laserové technologie

Vývoj laseru značně rozšířil jeho využití. Je možné ho najít v mnoha průmyslových odvětvích, ale i v běžném životě. Dají se rozdělit na výrobní a nevýrobní [1].

Nevýrobní laserové technologie jsou takové, které laserovým působením neubírají nebo jinak nepoškozují materiál. V průmyslu se používají pro měření vzdálenosti, kdy přístroj měří čas, za který se vyslané fotony odrazí a vrátí zpět. Na podobném principu funguje i čtení kompaktních disků. Také se mohou objevit ve formě čidel. Ty například chrání pracovníka před úrazem – okolo těla

stroje jsou vysílané paprsky, a když se přeruší tak, je stroj zastaven. Dále můžeme najít laser například v supermarketu při skenování čárových nebo QR kódů. V tomto případě je paprsek pohlcen černými proužky a bílými odražen. Skener pak přečte šířku jednotlivých pruhů a porovná je s tabulkou daných kombinací [1].

Výrobní laserové technologie mají velké uplatnění ve strojírenství. Jedná se o technologie, které svým působením přímo ovlivňují materiál. Takových technologií je celá řada. Důležitou technologií je **laserové řezání**. Jedná se o proces, kdy je paprskem zaměřeným do malého bodu dělen materiál. Vyniká svou rychlostí a kvalitním úzkým řezem s malou teplotně ovlivněnou oblastí. Účinnost řezání záleží na optických a tepelných vlastnostech, jako jsou absorpce a tepelná vodivost. Maximální tloušťka, kterou lze laserem řezat je 30 mm. Při řezání se může využít ochranná atmosféra inertního plynu. Řezání lze rozdělit na tavné, sublimační a oxidační [15].

Laser se také může použít k **povrchovému kalení** hřídelí, ozubených kol nebo turbínových lopatek. Výhody laserového kalení jsou homogenní a tenká zakalená vrstva, malá tepelná deformace a fakt, že není potřeba zakalenou součást chladit. Laserové kalení může být finální úpravou povrchu. Pro kalení se používají lasery v kontinuálním režimu se širokým svazkem [15].

Další často používanou technologií je **laserové svařování**. Paprsek je nutné co nejvíce zaměřit, aby vzniklo místo s vysokou hustotou energie a vznikla tak tavná lázeň. Laserem je možné svařovat bez přídavného materiálu. Dalšími výhodami jsou dostupná automatizace, vysoká rychlost, možnost vytvářet bodové i dlouhé svary a možnost svařovat i lehké kovy a jejich slitiny. Pro svařování se používají Nd:YAG a CO₂ lasery s vysokým výkonem [15][16].

Pro opravu součástí se používá **laserové navařování**. Navařováním je také možné vytvořit povlak na povrchu součásti za účelem zlepšení jeho odolnosti. Přídavný materiál se přidává ve formě drátu nebo prášku. Výhodou je, že paprsek nataví přídavný materiál a v malé míře i povrch. Vytvoří se tak dobře soudržný spoj [15][16]. Na podobném principu je založen laserový 3D tisk kovů.

Rozvíjející se technologií je **mikroobrábění**. Tam se dá zahrnout vrtání a povrchové úpravy (strukturování). Obě technologie jsou založeny na laserové ablaci. Pro tyto technologie se používají pulsní lasery s vysokým výkonem. Strukturováním povrchu součásti je možné např. zlepšit optické nebo kluzné vlastnosti, a vytvořit hydrofilní nebo hydrofobní povrch. Výhodou laserového mikroobrábění je možnost upravovat velmi tvrdé materiály [15].

Podobnou technologií je **gravírování**. Jde o odpařování materiálu pulsním laserem, kterým lze vytvořit nápis, reliéf nebo textura. Oproti mikroobrábění je tady mnohem více kladen důraz na výsledný vzhled. Popisovat lze široké spektrum materiálů: oceli, neželezné kovy, povrchově upravené kovy, dřevo, guma a pryž [15].

Laser lze využívat k **leštění povrchů**. Princip technologie leštění laserem spočívá v natavení tenké povrchové vrstvy laserem. Tavenina se vyrovná a během vychladnutí se nerovnoměrné drsný povrch vyhladí [15].

Oblíbenou technologií je **laserové čištění**. Pulsním laserem je možné odstranit z povrchu nečistoty – oxidační produkty (rez, okuje), oleje a maziva nebo organické nátěry. Laser téměř neovlivňuje základní materiál a celý proces je rychlejší a ekologicky snesitelnější, než konvenční metody [1].

1.4 Laserová bezpečnost

Stejně jako u konvenčních metod je předepsaný způsob ochrany, je nutné ho zavést i pro laserové technologie. Při nevhodném používání může být neopatrný pracovník lehce zraněn. Pro určité vlnové délky může koherentní a vysoce zaměřený paprsek způsobit lokální přehřátí tkáně. Snadno tak dojde k popáleninám, přehřátí sítnice oka a poškození zraku. Při jiném nastavení může paprsek způsobit i řezné rány [16].

Lasery lze zařadit do 4 bezpečnostních tříd:

Třída	Popis	Specifikace
I	Nízkovýkonové lasery, zapouzdřené lasery	oko vydrží dlouhodobý pohled do laserového svazku (cca 100 s)
II	Nízkovýkonové lasery ve viditelném spektru	oko je schopno se chránit mrkacím reflexem, vidí kontinuální a viditelný paprsek
III A	Nižší výkony laseru ve viditelném spektru	oko může být poškozeno i při velmi krátkém vystavení záření
III B	Střední výkony laseru ve viditelném spektru	Nebezpečné pro oko, nutno použít ochranné pomůcky
IV	Výkonové lasery	Nebezpečné pro oko i kůži, i při odrazu paprsku, nutno použít ochranu očí a pokožky

Tab. 1 Bezpečnostní třídy laseru [16]

Nejvýznačnějšími ochrannými pomůckami jsou brýle s polarizačním filtrem, které zachytí nežádoucí paprsek. Filtr dokáže zachytit světlo pouze jedné vlnové délky. Proto pro jiný laser nebo jinou harmonickou frekvenci je nutné použít jiný ochranný filtr [16].



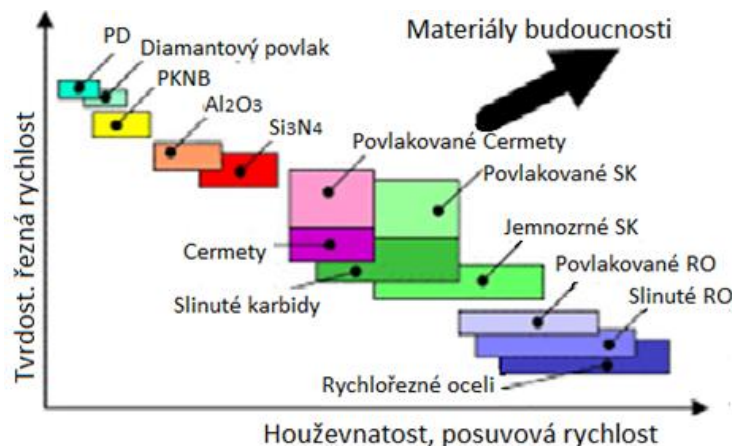
Obr. 3 Bezpečnostní symbol používaný pro lasery třídy II a vyšší [16]

2 Řezné nástroje

Kvalitní řezné nástroje jsou základem efektivní strojní výroby. Snahou výrobců je, aby nástroje co nejdéle vydržely a udržely si své řezné vlastnosti. Tím se dosáhne zefektivnění a zlevnění výroby. V současné době je oblíbené a účinné kvalitní základní materiál povlakovat, aby se prodloužila jeho životnost.

2.1 Nosný materiál

Základní, nosný materiál, také nazývaný substrát, se vybírá dle požadavků na nástroj. Vždy je ale potřeba co největší tvrdost, houževnatost, odolnost proti otěru a vysokým teplotám. Dále také co nejmenší cena a snadná výroba. Některé tyto vlastnosti se navzájem vylučují, proto je potřeba najít vhodný kompromis. Je možné nástroj vyrobít z rychlořezné oceli, slinutých karbidů nebo cermetů. Tyto materiály se běžně povlakuji. Pak je možné využít řeznou keramiku a tzv. supertvrdé materiály jako jsou kubický nitrid boru (KNB) nebo syntetický diamant (viz Obr. 4). Nejčastěji se však používají slinuté karbidy, proto jim bude věnována vyšší pozornost [2].



Obr. 5 Dostupné materiály pro řezné nástroje [24]

2.1.1 Slinutý karbid

Slinutý karbid (dále SK) je kompozitní materiál, který se skládá z karbidů kovů (převážně Wolframu) a kobaltové matrice. Vyrábí se práškovou metalurgií. Do formy se nasype potřebný prášek. Ten se pak pomocí teploty a tlaku spojí. Tzv. slinování (také spékání) je založeno na ohřátí prášku pod teplotu tání, při které se částice spojí. Při tomto procesu se objekt smrští, s čímž je třeba počítat

při navrhování formy. Slinutý karbid je tvrdý, ale křehký materiál. Výrobek větších rozměrů se při zatížení snadno láme. Proto se používá pouze pro výrobu vyměnitelných břitových destiček a stopkových nástrojů. Kvůli zlepšení houževnatosti a dalších vlastností se do směsi přidávají i karbidy tantalu, titanu a niobu [2].

Karbidy je možné rozdělit do několika skupin [2]:

Skupina K – tzv. jednodokarbidové SK se skládají z WC-Co. Karbidy této skupiny jsou snadno tepelně ovlivnitelné. Jsou vhodné pro obrábění litiny s lupínkovým grafitem, neželezných slitin a nekovových materiálů. Tyto materiály vytvářejí krátkou drobnou třísku a tepelně ovlivňují karbid jen málo.

Skupina P – tzv. dvojkarbidové SK na bázi WC-TiC-Co. Pro tuto skupinu je charakteristická dlouhá tříska. Díky příměsi TiC jsou odolné vůči tepelné difuzi. Jsou vhodné pro obrábění uhlíkových, korozivzdorných a slitinových ocelí.

Skupina M – vícekarbidové Sk: WC-TiC-TaC/NbC-Co. Používá se pro materiály tvořící dlouhou a středně dlouhou třísku, jako je litina s kuličkovým grafitem, lité a austenitické oceli.

Mimo tyto základní skupiny existují tři doplňkové skupiny, které se mohou překrývat:

Skupina N – SK pro obrábění neželezných slitin s hliníkem, hořčíkem, mědí a plastů.

Skupina S – SK pro obrábění žáropevných slitin s niklem, kobaltem, železem a titanem.

Skupina H – SK vhodné pro obrábění zušlechťených a kalených ocelí.

I přes kontinuální snahu výrobců materiál zlepšovat se slinuté karbidy potýkají s řadou problémů. Výrazným je například ovlivnění kobaltu při zpracování nebo zatížení – kobalt se vypařuje snáze než tvrdé molekuly WC nebo TiC. Karbidy jsou i s přidanými prvky relativně křehké. Tvrdé ochranné povlaky chrání nástroje ze slinutých karbidů před tepelnými a chemickými vlivy při obrábění. Povlaky také zmenšují tření a tím pádem prodlužují životnost nástroje.

2.2 Povlaky

Všechny řezné nástroje se dříve nebo později v průběhu obrábění opotřebí. Výroba nových nástrojů je časově náročná a nákladná, proto převládá snaha co nejvíce prodloužit životnost nástroje za daných pracovních podmínek. Toho můžeme docílit i vylepšením samotného materiálu nástroje. Tento proces je však také zdlouhavý a ne vždy přináší požadované výsledky. Účinným prostředkem tak může být povrchové povlakování. Vrstva ochranného povlaku se nanese na nástroj v tenké vrstvě (např. několik μm) a tím se zlepší vlastnosti celého nástroje. Konkrétně se povlakováním cílí na tvrdost, otěruvzdornost, odolnost proti křehkému lomu, korozi a tepelným vlivům a také snížení třecích sil [2]. Povlaky se používají od 60. let minulého století, kdy firma Sandvik Coromant uvedla na trh břitové destičky s povlakem TiC. Od té doby prošly povlaky dynamickým vývojem. Běžně se uvádí vývoj takto [2]:

1. Generace: jednovrstvý povlak TiC o tloušťce 6 μm . Zpočátku měl povlak kvůli nedokonalé technologii špatnou adhezi k substrátu. Vznikal křehký eta-karbid mezi substrátem a povlakem. Při obrábění se povlak snadno rozlamoval a odlupoval.
2. Generace: jednovrstvý povlak TiC, TiCN, TiN se zdokonalenou technologií. Povlak měl dobrou soudržnost k substrátu. Tloušťka až 10 μm .
3. Generace: dvou a vícevrstvý povlak. Nižší vrstvy tvoří materiály s lepší adhezí k substrátu, vyšší materiály s lepší tvrdostí a jinými řeznými vlastnostmi. Vrstvy mají ostré přechody. Používané řady povlaků jsou: TiC- Al_2O_3 ; TiC-TiN; TiC-TiCN-TiN; TiC- Al_2O_3 -TiN.
4. Generace: multivrstvý povlak. Deset a více vrstev ze stejných materiálů, jako u 3. Gen., ale také povlaky diamantové a z kubického nitridu boru. Diamantové povlaky (DLC – diamond like carbon) jsou velmi tvrdé povlaky ze syntetického diamantu.

V současné době se používají dvě základní metody nanášení povrchových vrstev na řezné nástroje - PVD a CVD.

2.2.1 Nanášení povrchových vrstev metodou PVD

Metoda PVD spočívá v ohřevu materiálového terče (materiál, ze kterého je vyráběn povlak), ze kterého se odpařují nebo odprašují částice a dopadají na substrát (řezný nástroj). Celý proces probíhá za nízkých teplot (cca 400°C) a tlaků, který se blíží tlaku vakua. Metoda PVD má dva směry, kterými je možno se vydat: napařování a naprašování. U napařování je terč umístěn pod substrátem a materiál se na něj uchyťává ve formě výparů. Naprašování je o něco složitější: proces probíhá v atmosféře pracovního plynu (nejčastěji argonu). Materiál je připojen na napětí a zapálí se před ním doutnavý výboj. Ten ionizuje plyn. Ionty pak putují k opačnému pólu a po cestě vytrhávají částice z materiálového terče [2] [3].

Metody oddělení částic z terče:

- Radiofrekvenčními vlnami - výhodou je možnost pracovat i s nevodivými povlaky
- Iontovým paprskem – vznikají plynné ionty na naprašování
- Elektronovým paprskem – vypařování materiálu
- Pomocí magnetického pole (MSD – magnetron sputter depositions) – vylepšené naprašování – magnetické pole drží ionizované atomy na siločárkách a tím se zvyšuje pravděpodobnost další ionizace
- Elektrickým obloukem – výboj mezi dvěma elektrodami
- Laserem

Metoda PVD vytváří tenké vrstvy na nástroji a dokáže zachovat ostří (s poloměrem zaoblení břitu pod 20 μm). Nevýhodou je však tzv. stínový efekt – částice se neusazují na substrátu rovnoměrně, ale pouze na plochách ve směru, ve kterém putují od terče. Proto je potřeba nástrojem otáčet, aby byl povlak všude rovnoměrný. Dalším výdajem je složité vakuové zařízení, ve kterém proces probíhá [2].

2.2.2 Nanášení povrchových vrstev metodou CVD

Metoda CVD je založena na reakci plynných sloučenin s povrchem substrátu (rozklad molekul, substituce, redukce). Sloučeniny jsou nesené

k substrátu pracovním plynem (Argon, H₂ nebo CH₄). Proces probíhá za vysoké teploty (800°C+), to může nepříznivě ovlivnit povlakovaný substrát [1].

Aktivace reakcí:

- Tepelně indukovaná (mikrovlny, žhavicí vlákno)
- Plazmaticky aktivovaná (výboj) PCVD, PACVD
- Fotonově indukovaná (laser)

Povlaky vytvořené metodou CVD se u slinutých karbidů používají častěji, než PVD. CVD povlak dobře přilíná k substrátu, je rovnoměrný a stejně hustý ze všech stran.

Dále se používají i různé variace CVD metody: MWP-CVD (microwave plasma); MTCVD (middle temperature); LPCVD (low pressure); LICVD (laser induced) a další. Mění se způsob oddělování částic z materiálového terče.

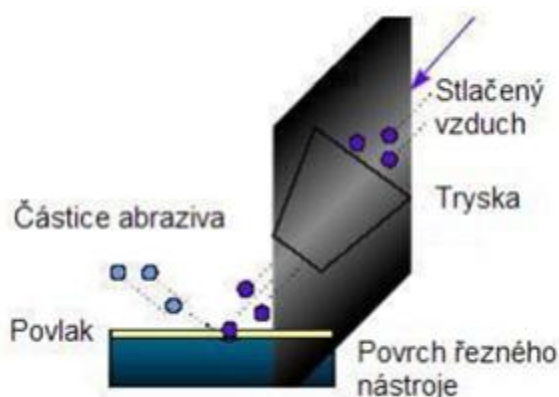
Povrch je nutno před povlakováním očistit od mastnot, od stop po broušení (odjehlení, pískování) a dalších možných závad a nečistot. Častou praxí je regenerace nástrojového povlaku, a v takovém případě je nutné nejprve z povrchu nástroje odstranit zbytky starého povlaku [2].

3 Odstraňování povlaků

Odstranění starého povlaku je náročný úkol. Existuje několik metod, z nichž každá je vhodná pro jiné materiály. Při odstraňování povlaků (také se používá slovo stripping) je potřeba zvážit vlastnosti konkrétního povlaku na daném materiálu. Metoda vhodná pro rychlořezné oceli může poničit povrch slinutého karbidu natolik, že je nástroj nepoužitelný. Téma strippingu je předmětem výzkumů. Jsou realizovány experimenty s cílem nalezení vhodných metod pro dané povlaky. Stripping je významnou součástí procesu opravy řezných nástrojů. Po odstranění starého povlaku a přebroušení je nástroj opět napovlakován. Je nutno předem posoudit, zda se odstranění povlaku danou metodou ekonomicky vyplatí.

3.1 Mechanické odstraňování povlaků

Jednou z nejstarších metod je abrazivní otryskávání. Také se používá výraz pískování. Velmi malé částice se pomocí stlačeného vzduchu vysokou rychlostí metají na povrch (viz Obr. 6). Abrazivo musí dopadat pod přesným úhlem. Náraz a zarývání částic do povlaku z něj pak vytrhává jeho kusy. Abrazivo musí mít větší tvrdost než daný povlak. Pro nejtvrďší povlaky se používá diamantový nebo korundový prach. Tato metoda má mnoho nevýhod. Otryskávání zanechává povrch s vysokou drsností, poškozují ostří, obecně zaobluje hrany, snižuje jakost povrchu a zvyšuje vnitřní pnutí [3].



Obr. 7 Schéma abrazivního tryskání [3]

Obdobou této metody je tryskání za pomoci suchého ledu. Princip je podobný jako u klasického tryskání, liší se pouze v použitém abrazivu. Tím je suchý led. Částice suchého ledu při dopadu ochladí povrch nástroje. Povlak se v reakci na teplotní skok smrští a popraská. Povlak je poté vytrhán dalšími dopadajícími částicemi suchého ledu anebo sublimujícím CO₂. Roztahující se plyn sebou nese části povlaku. Tato metoda je šetrnější než běžné tryskání. Celý proces však musí být precizní, při delším dopadu částic na jedno místo se nástroj ochlazuje více a odstraňování povlaků se zpomaluje [3].

Mechanické metody lze použít na všechny typy povlaků i supertvrdé materiály (DLC, KBN). U těchto metod je obecně problém s nerovnoměrným úběrem materiálu, na substrátu mohou zůstat místa se zbytkem povlaku nebo naopak s poškozeným substrátem.

3.2 Chemické odstraňování povlaků

Nejvíce využívanou metodou je stripping pomocí chemikálií. U této metody je důležité znát, jak agresivní je daný roztok vůči substrátu. Může se stát, že chemikálie při odstraňování povlaku poničí povrch nástroje. Tato metoda je i časově náročná, proces odpovlakování trvá i několik hodin.

Pro rychlořezné oceli se nejčastěji používá roztok peroxidu vodíku a tetranadiumdiosfátu [2], nebo jiné sloučeniny na bázi H₂O₂. U ocelí je možné bezpečně odstranit povlaky, kde převažuje titan. Nástroj se poté musí omýt a pasivovat. U HSS může dojít ke korozi substrátu, když je během tohoto procesu v kontaktu s vodou a kyslíkem. Odstraněný povlak společně s chemikálií pak tvoří sloučeniny, které mohou být závadné pro životní prostředí. Například šestimocný chrom, který byl prohlášen za karcinogen. V odpadu se také mohou vyskytovat různé olejové emulze. Likvidace odpadu je upravena zákony, regulována a sledována [4].

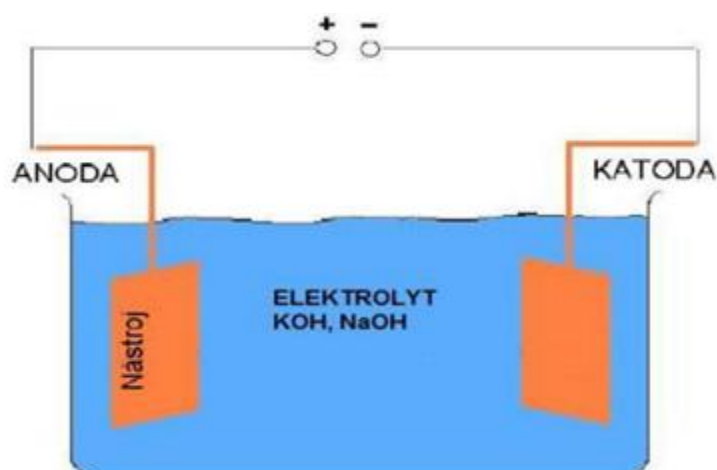
U slinutých karbidů je situace obtížnější. Větší množství chemikálií, včetně zmíněného roztoku peroxidu vodíku reaguje s kobaltem. Dochází k odleptání kobaltu v tenké vrstvě na povrchu. V tenké vrstvě (5 μm a více, do této tloušťky lze povrch opravit) jsou obnažena zrna karbidu. Ty pak ztrácí soudržnost a snižuje se adheze povlaku k substrátu. Takto poškozený nástroj je

také více náchylný k mechanickému poškození. V mezerách mezi zrny se může při obrábění koncentrovat napětí a je pravděpodobné, že se odsud bude iniciovat křehký lom [2].

Chemicky je možné odstraňovat téměř všechny povlaky. DLC povlaky jsou vůči chemikáliím nereaktivní, tudíž se touto metodou přímo odstranit nedají. Je také potřeba znát velice přesně daný substrát a povlak, abychom mohli stejně přesně odhadnout složení a koncentraci chemické lázně. Některé chemikálie je možné používat jen na určité materiály. Dalším problémem je chemický odpad. Po strippingu je nutné zlikvidovat i stolitrové lázně a ne vždy je to jednoduché nebo levné.

3.3 Elektrochemické odstraňování povlaků

Další z oblíbených metod strippingu je metoda využívající elektrochemické lázně. Jedná se v podstatě o obrácený proces galvanického pokovení. Nástroj tvoří anodu a je ponořen do elektrolytu. Připojením na stejnosměrný proud malé hodnoty (řádově mA) a malého napětí (mV) se povlak postupně rozpustí. Proces se však musí sledovat a ve správnou chvíli zastavit, tedy odpojit od zdroje napětí a proudu a vyndat nástroj z lázně. Ve chvíli, kdy je povlak úspěšně odstraněn, se změní hodnota potenciálu na nástroji. Elektrolytem bývá často roztok NaOH nebo jiné hydroxidy: KOH, HNO₃ atp [3] [5].



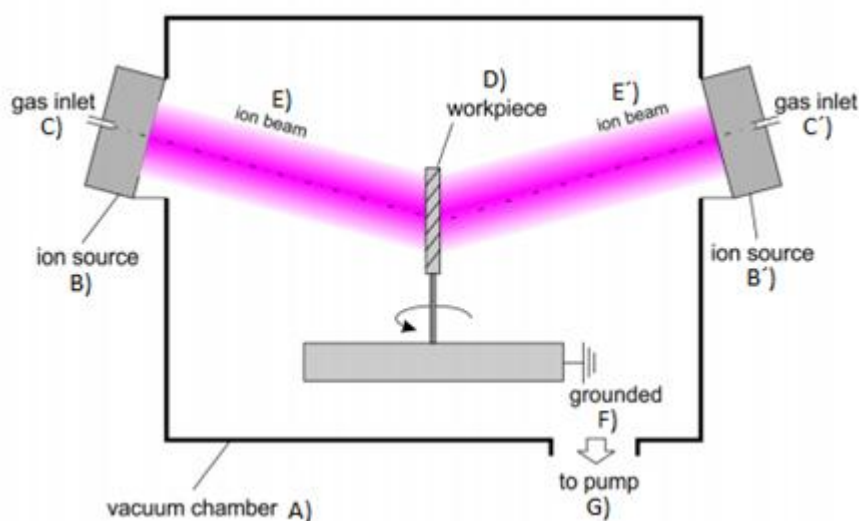
Obr. 8 Schéma elektrochemického odstraňování povlaků [3]

Elektrochemická metoda se osvědčila pro monovrstvy a multivrstvy obsahující chrom a jeho sloučeniny. Je příznivější pro životní prostředí než čistě chemická cesta, při které se vytváří sloučeniny šestimocného chromu. Lze jí použít na všechny vodivé povlaky. Při elektrochemickém strippingu vzniká odpadní lázeň, podobně jako u chemické metody.

3.4 Fyzikální odstraňování povlaků

V průmyslovém světě je tendence neustále zlepšovat a zrychlovat produkci. Platí to i pro metody strippingu. Proto se hledají alternativní metody, které jsou přívětivější pro nástroj i životní prostředí.

První takovou nekonvenční metodou je ostřelování povrchu ionty plynu. Nástroj (viz Obr. 9 D) se umístí do vakuové komory (A) a elektricky uzemní (F). Poté se na něj pálí pod určitým úhlem ionty argonu a O_2 . (E, E') Ionty kyslíku reagují s povlakem, oxidují ho, a vytváří na povrchu nové sloučeniny (oxidy). Ionty Argonu jsou nereaktivní a působí zde jako abrazivo. Narážejí na nové oxidy a „odstřelují“ je z povrchu. Nástrojem je potřeba otáčet, aby se paprsky mohly dopadat na všechny plochy a nástroj byl rovnoměrně odpovlakován. To trvá řádově hodiny. Tato metoda je náročná na zařízení, a také dost pomalá, proto se v praxi téměř nepoužívá. Tuto metodu lze používat pro jakýkoliv povlak [6].



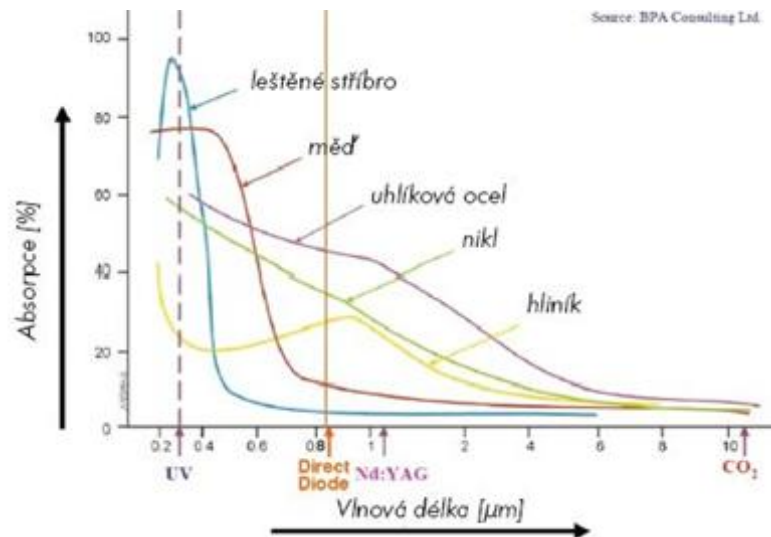
Obr. 10 Schéma odstraňování povlaků iontovým paprskem A) vakuová komora, B) zdroj iontového paprsku, C) přívod plynu, D) odpovlakovaný nástroj, E) iontový paprsek, F) uzemnění, G) vývod vakuové pumpy [3]

4 Odstraňování povlaku laserem

Výše popsané metody jsou sice účinné, ale potýkají se s různými problémy. Proto se objevila myšlenka vyvinout nový, rychlý a efektivní způsob: odstraňování povlaku laserem. Princip této metody spočívá v interakci laserového paprsku v krátkých pulsech (mikrosekundy, nanosekundy, pro velice tvrdé povlaky i pikosekundy) s povrchem nástroje. Paprsek předá tenké vrstvě energii a částice povlaku se vypaří. Funguje podobně jako gravírování a je založen na laserové ablací [1].

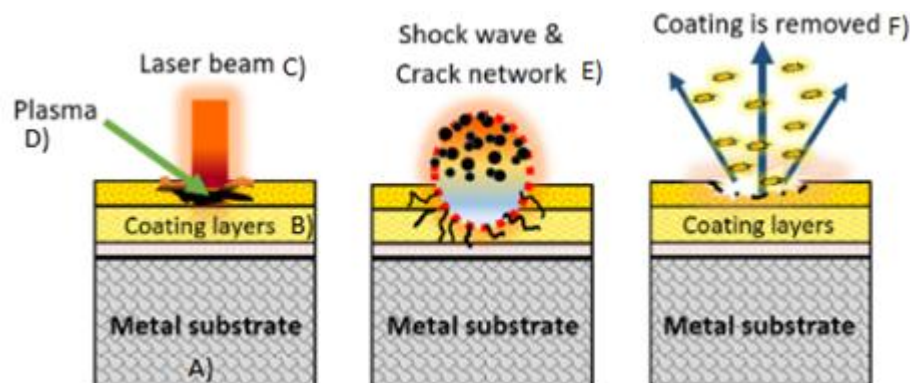
4.1 Laserové čištění

Čištění povrchu laserem je oblíbená a rozšířená metoda. Je používána jako alternativa k mechanickým či chemickým způsobům. Její výhodou je, že k ní není potřeba žádné abrazivo či chemikálie. Odpad a zátěž pro životní prostředí je tak minimální. Samotné čištění pak probíhá takto: velmi krátké pulsy paprsku dopadají na povrch a předávají mu energii. U kratšího pulsu je možné dosáhnout vyšší intenzity a špičkového výkonu. Energie paprsku se změní na tepelnou. Bod, do kterého paprsek dopadne, se pak lokálně ohřeje a materiál se odpaří. Větší efektivity je dosaženo, pokud se body dopadu částečně překrývají. Dále je potřeba vzít v úvahu vlnovou délku paprsku. Monochromatický paprsek o určité vlnové délce může být pohlcen jedním materiálem, a jiným téměř dokonale odražen. Tohoto jevu se při laserovém čištění využívá (viz Obr. 11). Nd:YAG dokáže odstranit okuje uhlíkové oceli, ale podklad zůstane nezměněn. Naopak je laser s touto vlnovou délkou velmi nevhodný pro odstranění povlaků na bázi mědi [1].



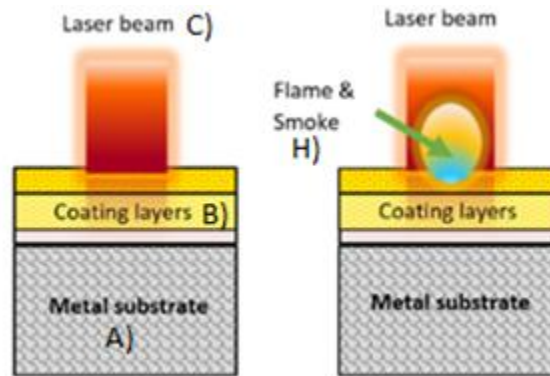
Obr. 12 Závislost absorpce paprsku materiálem na vlnové délce daného paprsku [14]

Pro laserové čištění se používají dva mechanismy odebírání materiálu – laserová ablace a termální rozklad [10]. Princip laserové ablace spočívá v tom, že paprsek (v Obr. 13 označen C) předá svou energii povrchové vrstvě (B) a přemění ji na plasmu (D). Plasma má vysoký tlak a vytvoří nárazovou vlnu (E). Vlna se šíří vysokou rychlostí, při rozpínání vytrhne částice povlaku (F) a způsobí vznik trhlin v povrchové vrstvě (viz Obr 8). Tento proces se opakuje, dokud není odstraněna celá nežádoucí vrstva [10].



Obr. 14 Princip laserové ablace A) kovový substrát, B) vrstvy povlaku, C) laserový paprsek, D) plasma, E) tlaková rázová vlna a síť prasklin, F) povlak je odstraněn [10]

Termální rozklad je v podstatě spalování povrchové vrstvy. Paprsek s krátkým pulsem a malým výkonem zahřeje a nataví bod, do kterého dopadne. Nečistoty se pak částečně opálí a částečně vytrhnou kvůli teplotní roztažnosti (H) [10].



Obr. 15 Princip termálního rozkladu A) kovový substrát, B) vrstvy povlaku, C) laserový paprsek, H) plamen a spaliny [10]

Tímto způsobem lze bezpečně odstranit barvu, lak a korozní oxidační produkty. Laserového čištění se využívá například při odstranění nátěru z letadel nebo při restaurování uměleckých děl (soch, fresek a obrazů). Dále také lze čistit olejové nánosy v potravinářském průmyslu, odmašťovat kovy a čistit je před další úpravou (svařováním, pájením, pokovením, ale i barvením a lakováním) [11].

Technologie odstraňování tvrdých povlaků z řezných nástrojů je klasickému čištění dost podobná. Také je založena na bodovém vypařování materiálu z povrchu. Liší se v parametrech zvoleného stroje a paprsku.

4.2 Stripping

Laserové odstraňování nečistot a odpadních produktů je podobné jako laserové odstraňování tvrdých ochranných povlaků. Je potřeba použít laser s vysokým výkonem a délkou pulsu v nanosekundách nebo kratších. Paprsek vycházející ze zdroje je potřeba usměrnit a zaměřit pomocí soustavy zrcadel a čoček. Často se využívá galvo hlava se dvěma (nebo více) zrcadly, které se vůči sobě natáčejí a umožňují vychylování výsledného bodu dopadu paprsku.

V následující tabulce jsou zaznamenány již zavedené (publikované jinými výzkumnými týmy) parametry procesů laser strippingu.



Literatura	[7]	[8]	[9]	[17]
Typ laseru	KrF Excimer laser (GSI IPEX 848)	KrF Excimer laser (GSI Lumonics IPEX 848)	(DPSS laser, Nd:YAG krystal)	Nd:YVO4
Průměrný výkon [W]	80	80	90	8
Špičkový výkon [MW]	25	38	6,3	40 W
Vlnová délka [nm]	248	248	355	532
Délka pulsu [ns]	16	12	50	10 000
Vliv energie na plochu - Fluence [$J \cdot cm^{-2}$]	1,62 ÷ 2,36	2 ÷ 7	0,68 ÷ 7,44	1,62
Počet pulsů na bod	250	50 ÷ 300	61,6 ÷ 509,6	300
Maximální (použitá) frekvence [Hz]	200 000 (25)	200 000 (100)	10 000	20 000
Velikost čištěné plochy [mm^2]	4x4	7x7	4x4	3x3
Průměr svazku [mm]	Ø0,2	0,7-0,7	Ø0,01	Ø0,1
Substrát	WC	HSS	WC-Co	ocel AISI 1040 C40
Povlak	TiN 2 μm	CrTiAlN 2 μm	TiAlN 1,5 μm	Cr-Cr:DLC-DLC 6 μm
Metoda povlakování	PVD – magnetronové naprašování	PVD – magnetronové naprašování	PVD	PVD/PE-CVD
Sledované parametry	Ideální nastavení parametrů stroje pro minimální poškození karbidového substrátu	Vliv překrývání jednotlivých pulsů na drsnost povrchu	Vznik mikrotrhlin do 0,2 μm , drsnost povrchu, tvar drsností, hloubka odstranění povlaku; pro různé kombinace počtu pulsů a energie	Počet potřebných přejetí (odstraněných vrstev) pro odstranění povlaku, změna počtu smyček a rychlosti a vliv na povrch substrátu
Výsledek	Podmínky, se kterými byl povlak nejlépe odstraněn, jsou: 2 $J \cdot cm^{-2}$; 25 Hz; 1950 pulsů v jednom bodě	Paprsek s energií 2 $J \cdot cm^{-2}$, frekvencí 100 Hz a překrýváním pulsů 90% dal nejlepší výsledek, a sice $Ra=0,415 \mu m$.	Mikrotrhliny vznikají u všech nastavení laseru. Nejlepší drsnost pro 61 pulsů a 4,06 $J \cdot cm^{-2}$. Největší úběr materiálu pro 453 pulsů a 7,4 $J \cdot cm^{-2}$.	Ideální počet smyček laseru je (pro úplné odstranění daného povlaku) 7÷15; rychlost přejezdu $v \leq 200 mm \cdot s^{-1}$ s výsledným $Ra=0,45 \mu m$.

Tab. 2 Publikované způsoby laser strippingu.

Laser stripping je často charakterizován pomocí plošné hustoty energie (laser fluence $\text{J}\cdot\text{cm}^{-2}$). Dá se vypočíst takto:

$$\text{Fluence} \left[\frac{\text{J}}{\text{cm}^2} \right] = \frac{\text{energie pulsu laseru [J]}}{\text{plocha efektivně ozářená paprskem [cm}^2\text{]}}$$

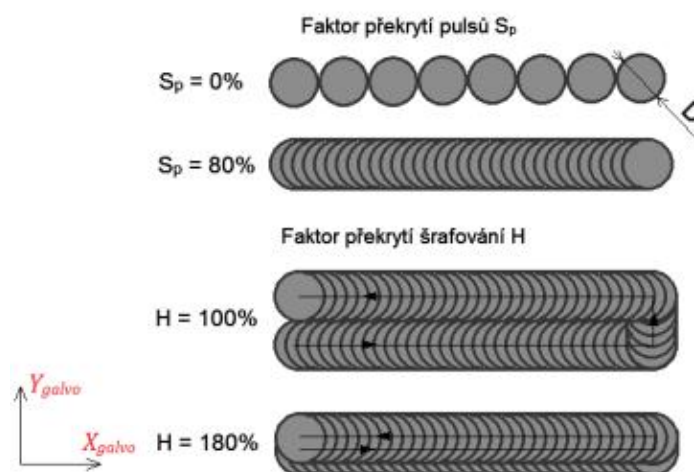
Energie v pulsu:

$$E_p [\mu\text{J}] = \frac{\text{Výkon [W]}}{\text{frekvence [kHz]}} \cdot 1000$$

Rychlost rozmítání (pro 70% překrytí):

$$vf \left[\frac{\text{mm}}{\text{s}} \right] = \text{frekvence [Hz]} \cdot (0,3 \cdot \text{průměr svazku [mm]})$$

Překryv pulsů v jedné ose vyjadřuje, o jakou vzdálenost je následující místo dopadu paprsku na plochu posunuto od předchozího místa dopadu. Překryv se udává v procentech průměru svazku. Například při požadovaném překryvu 70% a průměru svazku $d=0,2$ mm jsou pulsy vůči sobě posunuty o 0,06 mm. Tedy pulsy se posunuly o 30% a ze 70% se překrývají (viz Obr. 16).



Obr. 17 Překrytí pulsů ve dvou osách [28]

Testování v literatuře [7] mělo za úkol zjistit ideální parametry pro odstranění TiN povlaku pro nejmenší poškození substrátu. Bylo vyzkoušeno několik hodnot plošné hustoty energie, konkrétně: 0,5; 1; 2; 4; 6 $\text{J}\cdot\text{cm}^{-2}$. Ideálními parametry se ukázaly být 2 $\text{J}\cdot\text{cm}^{-2}$; 25 Hz.

Činnost v literatuře [8] byla provedena za účelem zjištění vlivu překryvu pulsů na konečný povrch. Parametry testu byly: frekvence pulzů 100 Hz; plošná hustota energie (fluence) 2 $\text{J}\cdot\text{cm}^{-2}$; rychlost pohybu paprsku 0,45 $\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$

(překryv pulsů 0 %), $0,9 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ (překryv 50 %), $1,8 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ (překryv 75 %), $3,15 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ (překryv 85 %), $4,2 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ (překryv 90 %) a $6,3 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ (překryv 93 %). Nejlepší povrch se ukázal být pro $4,2 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ (překryv 90%), kdy výsledná drsnost R_a byla $0,415 \mu\text{m}$ (viz Obr. 11).

V pokusech z literatury [9] byl sledován vznik mikrotrhlin v substrátu, a zda se mu dá zabránit. Dále byla věnována pozornost drsnosti povrchu, rovnoměrnosti úběru materiálu a kvalitě výsledného povrchu. To vše pro různé parametry laserového zařízení. Výsledkem experimentu je zjištění, že mikrotrhliny vznikají pokaždé a nelze jim zabránit. Pro frekvenci 10 kHz a rychlost $500 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ byla nejvyšší drsnost povrchu ($R_a = 0,4 - 0,5 \mu\text{m}$) pro fluence $7,4 \text{ J}\cdot\text{cm}^{-2}$ a 453 pulsů v jednom bodě. Nejnižší drsnost povrchu ($R_a = 0,1 - 0,2 \mu\text{m}$) vyšla pro fluence $4,06 \text{ J}\cdot\text{cm}^{-2}$ a 61 pulsů. Nejvíce diverzní tvar povrchu byl pro parametry fluence $3,38 \text{ J}\cdot\text{cm}^{-2}$ a 510 pulsů. Nejrovnoměrnější tvar povrchu pro fluence $3,38 \text{ J}\cdot\text{cm}^{-2}$ a 61 pulsů (viz Obr. 13). Nejmenší úběr materiálu (resp. hloubka ubíraného materiálu) bylo pro $0,68 \text{ J}\cdot\text{cm}^{-2}$ a 61 pulsů. Největší úběr materiálu byl pro fluence $7,4 \text{ J}\cdot\text{cm}^{-2}$ a 453 pulsů.

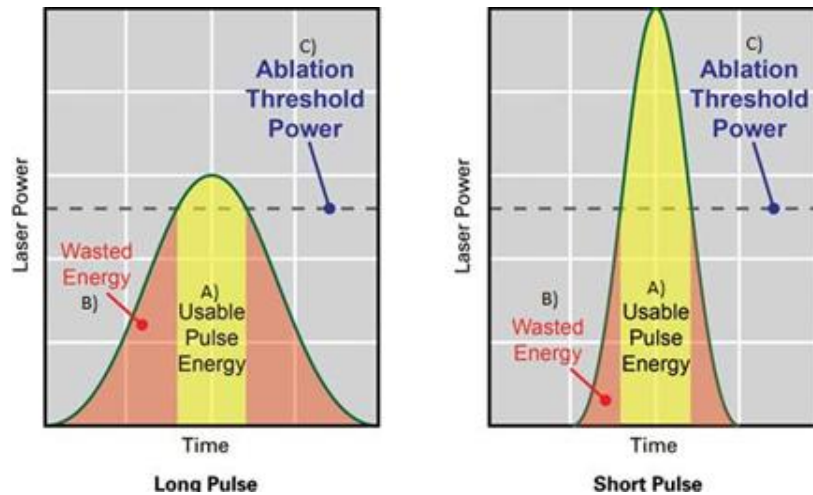
Pro odstranění Cr-Cr:DLC-DLC povlaku v literatuře [17] byl použit laser s dlouhým pulsem 10 000 ns, malým průměrným výkonem a variabilním překryvem – v ose y byl stálý, 90%, v ose x byl proměnlivý od -25% do 90 %. Bylo potřeba na plochu působit paprskem laseru opakovaně. Bylo zjištěno, že kompletní odstranění DLC povlaku nastává mezi 7-15 přejezdy pro různé parametry. Při rychlosti posuvu $600 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ (překryv v ose x 70%) a 5 přejezdů byla výsledná drsnost povrchu $0,5 \mu\text{m}$, ale při sedmi přejezdech byla drsnost R_a již $0,23 \mu\text{m}$.

Z uvedené literatury vyplývá, že je možné laserem odstranit různé druhy ochranných povlaků. Laserovým odstraňováním povlaku bylo dosaženo dobré hodnoty drsnosti. Ze zdrojů [7] [8] [9] [17] není zřejmé, zda je metoda odstraňování povlaku laserem efektivnější (rychlejší) než jiné metody.

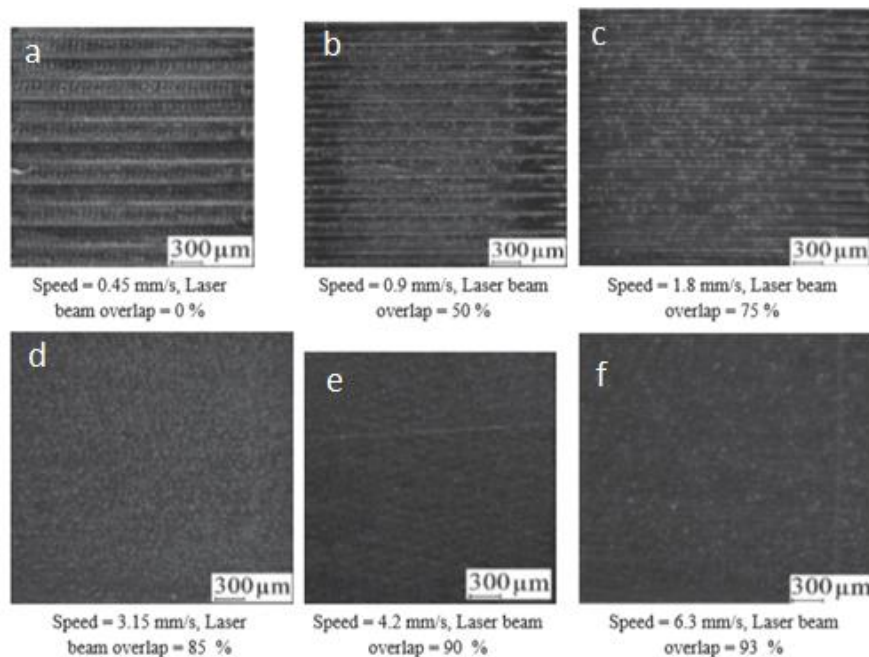
4.3 Sledované parametry laserového odstraňování povlaků

Stejně jako správné nastavení energie je důležitá i velikost plochy, na kterou dopadá paprsek. Nejčastěji se používá Gaussovské rozložení energie v paprsku (viz. Obr. 18). Nejvyšší energii paprsek přenáší v ose svazku,

směrem k okraji svazku se zmenšuje. Proto se zvětšující se plochou dopadu paprsku se pravděpodobnost nežádoucích efektů: nedostatečná energie je předána povrchu, ten se pouze nataví a zatuhne. V přetaveném materiálu vznikají mikrotrhliny a další problémy. Těmto vedlejším účinkům se dá částečně zabránit zmenšením plochy (pomocí zrcadel a čoček zaměřit paprsek do menšího bodu) a také překrýváním jednotlivých bodů [8].

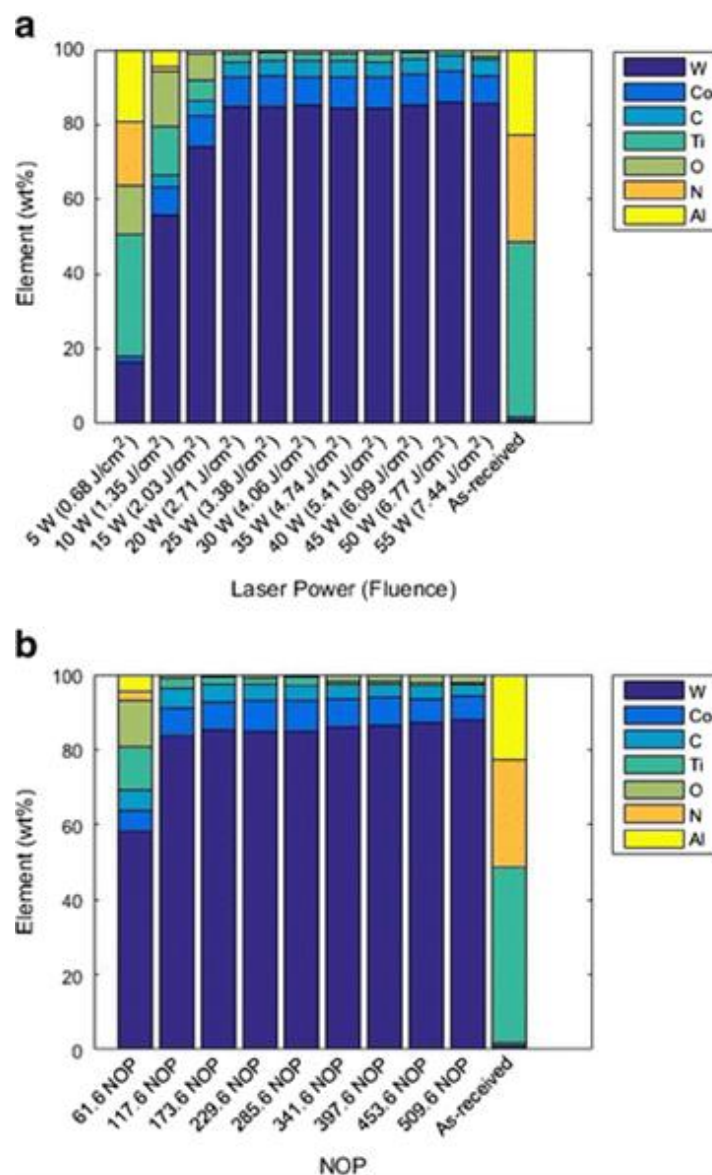


Obr. 19 Gaussovský typ paprsku. Závislost výkonu na čase při dlouhém pulsu (vlevo) a krátkém pulsu (vpravo): A) Použitelná energie jednoho pulsu, B) zmařená energie, C) výkon potřebný k překonání ablačního prahu [25]



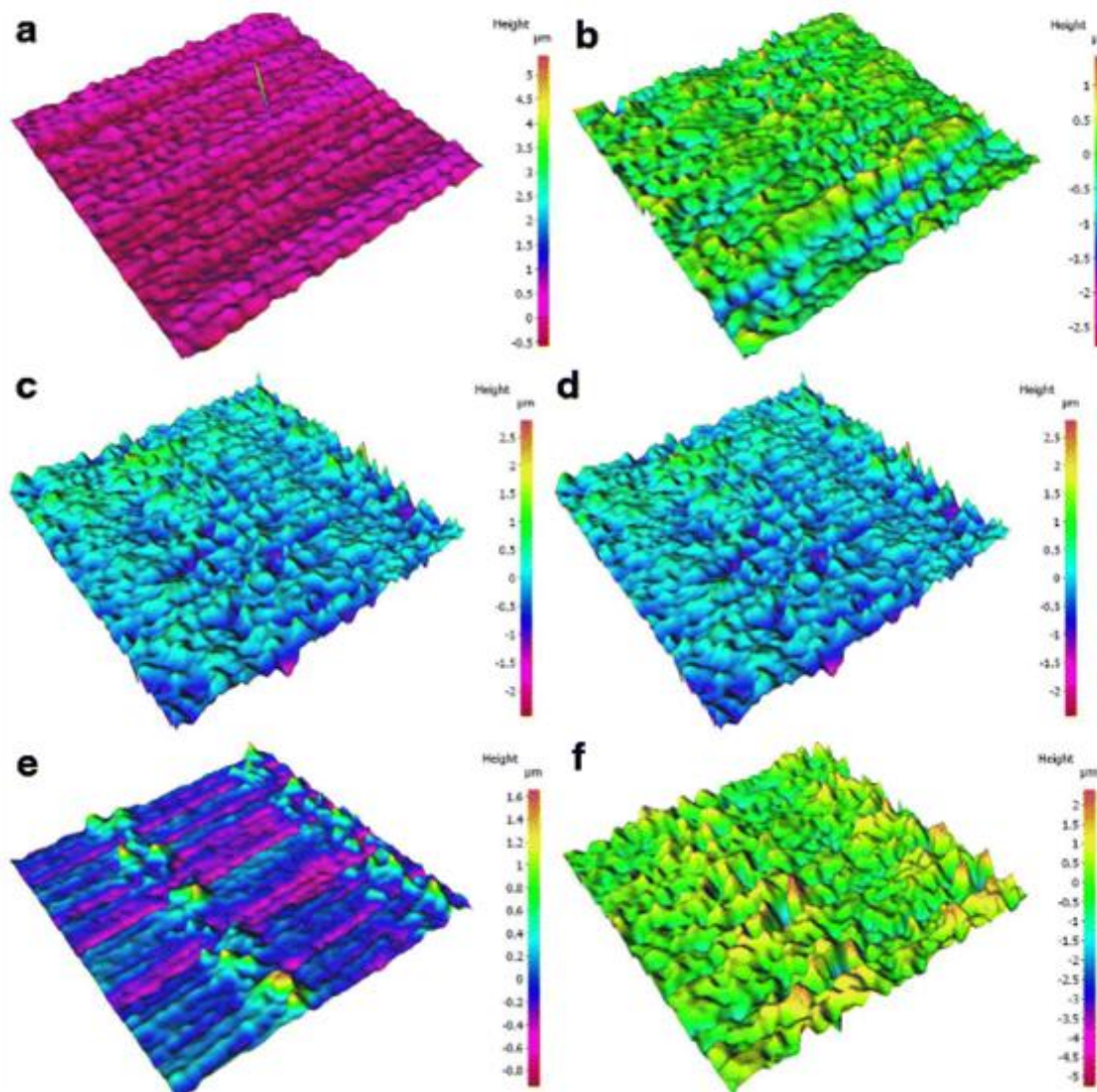
Obr. 20 Textura povrchu při různých rychlostech strippingu a překrývání pulsů. A – rychlost $0,45 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$, překryv 0 %; b – rychlost $0,9 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$, překryv 50 %; c – rychlost $1,8 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$, překryv 75 %; d – rychlost $3,15 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$, překryv 85 %; e – rychlost $4,2 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$, překryv 90 %; f – rychlost $6,3 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$, překryv 93 % [8]

Také bylo provedeno množství testů pro různé kombinace parametrů. Byl hledán ideální poměr počtu pulsů a výkonu paprsku. Nejprve byl zvyšován výkon pro stálý počet pulsů 285,6. Počet pulsů byl rozpočítán z celkového počtu pulsů na plochu. Při tomto počtu pulsů povlak TiAlN nebyl odstraněn při nastavení fluence 0,68 -2,03 J·cm⁻². Ve druhé sérii byl autory testován počet pulsů pro fluence 3,38 J·cm⁻² a frekvenci pulsů 10 kHz. Při tomto nastavení se nepodařilo povlak úplně odstranit pouze při nejmenším počtu pulsů 61,6 (v jednom bodě). Naměřené výsledky jsou znázorněny na následujících grafech (Obr. 21) [9].



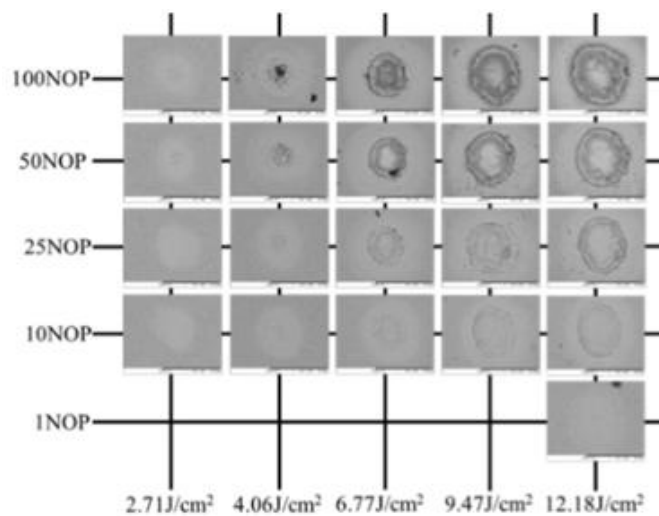
Obr. 22 Procentuální rozložení prvků v povrchu, ze kterého byl laserem odstraněn povlak, v závislosti na výkonu a počtu pulsů. A) počet pulsů 285,6 B) fluence 3,38 J·cm⁻² [9]

Dalšími hledisky pro hodnocení čištěného povrchu jsou vznik mikrotrhlin a celková drsnost povrchu. Trhliny vznikají vždy [9]. Povrch slinutého karbidu je mírně nataven a při tuhnutí zmenšuje svůj objem a tím pádem praská. Profil drsnosti se však značně liší pro různé kombinace počtu pulsů a fluence. Je třeba najít optimální poměr těchto dvou veličin. Příliš vysoký počet pulsů může povrch zničit. Ideálním nastavením se dle výzkumného týmu zdá být 61,6 pulsů v jednom bodě a fluence $3,38 \text{ J}\cdot\text{cm}^{-2}$ (viz Obr. 14).



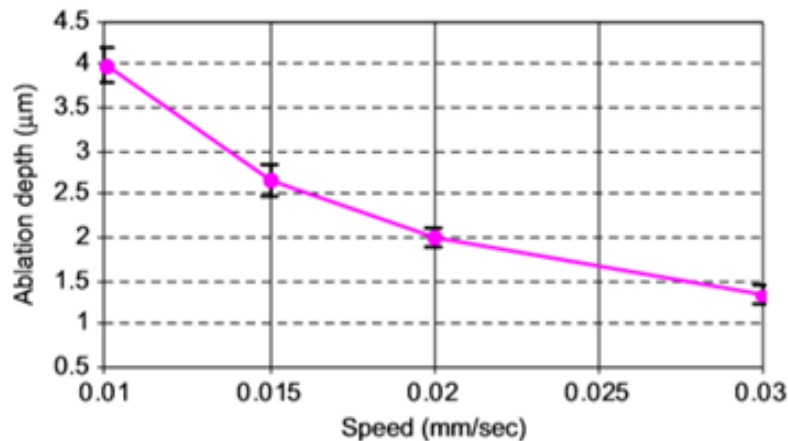
Obr. 23 Povrchová morfologie po laser strippingu A) původní, referenční povrch B) 285,6 pulsů a $3,38 \text{ J}\cdot\text{cm}^{-2}$;C) 285,6 pulsů a $5,41 \text{ J}\cdot\text{cm}^{-2}$;D) 285,6 pulsů a $7,44 \text{ J}\cdot\text{cm}^{-2}$;E) 61,6 pulsů a $3,38 \text{ J}\cdot\text{cm}^{-2}$;F) 509,6 pulsů a $3,38 \text{ J}\cdot\text{cm}^{-2}$ [9]

Dále proběhla studie, při které byl na stejném typu laseru a za stejných podmínek zkoumán ablační práh a poměr odstraňování povlaku. Pracovalo se s parametry z literatury [9]. Byly vyzkoušeny různé kombinace počtu pulsů a fluence (viz Obr. 24). Také byly sledovány mikrotrhliny na čištěném povrchu. Výsledkem bylo zjištění, že TiAlN povlak lze ze substrátu odstranit s nízkým počtem pulsů a malou energií. V tomto nastavení sice stripping trval déle, ale povrch substrátu nebyl výrazně poškozen. Při zvyšování počtu pulsů a fluence docházelo k tavení materiálu, a při opětovném tuhnutí na povrchu vznikaly trhliny [18] [19].



Obr. 25 Ablace materiálu v závislosti na počtu pulsů a fluence [18]

Důležitým parametrem je rychlost posuvu laserového paprsku, jež značně ovlivňuje hloubku ablace a množství odpařeného materiálu (viz. Obr. 26). Byla hledána optimální rychlost taková, aby došlo k odstranění požadované vrstvy a zároveň nebyl celý proces příliš dlouhý. Rychlost také přímo ovlivňuje překryv pulsů [7] [8].

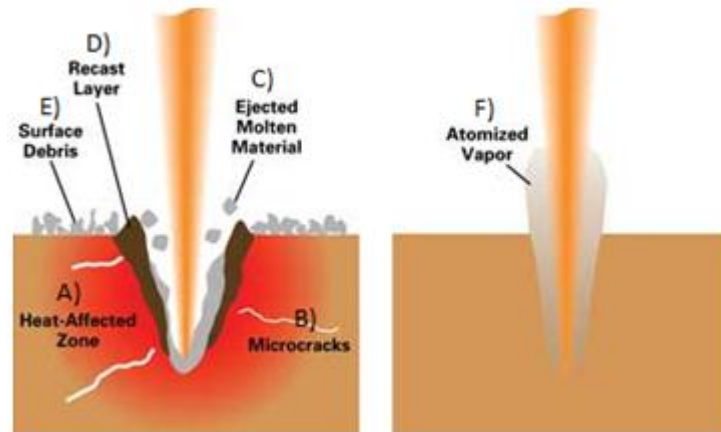


Obr. 27 Příklad vlivu rychlosti paprsku na hloubku ovlivněného materiálu [7]

Povrch řezných nástrojů lze po čištění upravit laserem. Paprsek nataví mikrovrstvu povrchu, která se poté nechá zatuhnout. Tím se vyrovnají mikronerovnosti povrchu a sníží se tření na nástroji. Proces musí ale být velice přesně proveden, může totiž dojít k nežádoucímu vypaření základního materiálu [20].

4.4 Nežádoucí efekty laserového odstraňování povlaků

V ideálním případě strippingu paprsek laseru odpaří pouze danou vrstvu a substrát nechá nezměněný. Ve skutečnosti však v malé míře tepelně ovlivňuje i povrch substrátu. V okolí ablačního bodu vzniká tepelně ovlivněná oblast (viz Obr. 28 A). Tato oblast vzniká vždy a nikdy ji nelze dokonale odstranit. Dá se pouze výrazně zmenšit volbou kratších pulsů. U slinutého karbidu může dojít k odpaření kobaltu ze substrátu, podobně jako u chemického strippingu. Rizika jsou stejná, tedy koncentrace napětí a vznik křehkého lomu, zhoršení adheze nového povlaku [18].



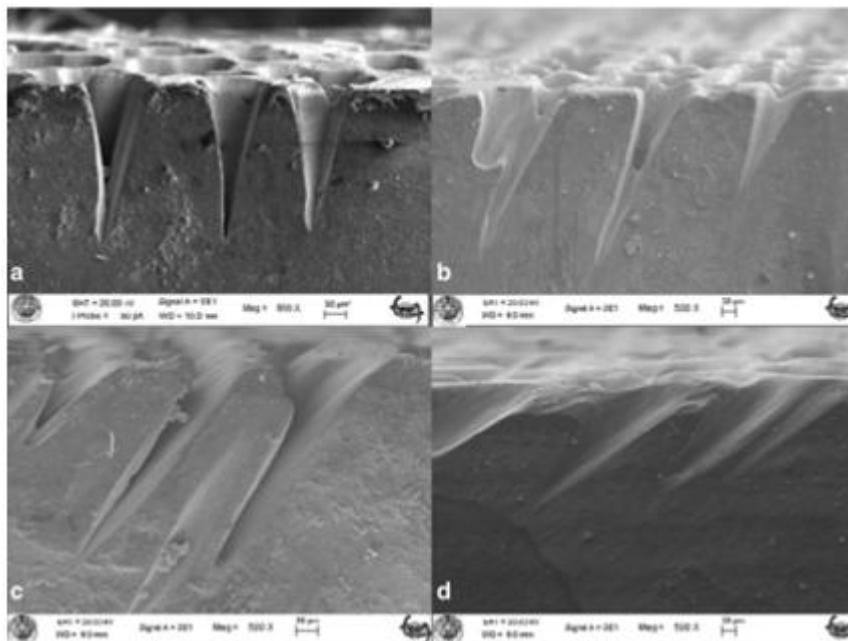
Obr. 29 Tepelně ovlivněná zóna při delších pulzech (vlevo) a ideální, teoretická zóna (vpravo). A) teplem ovlivněná zóna, B) mikrotrhliny, C) vystřelený roztavený materiál, D) přetavená vrstva, E) úlomky materiálu na povrchu, F) mlžný výpar [26]

Dalším problémem může být nedokonalá absorpce paprsku kvůli nevhodně zvolené vlnové délce. V takovém případě paprsek projde povlakem a energii absorbuje nižší vrstva nebo substrát. Tato energie se přemění v tepelnou. Povrch pod povlakem se zahřívá a oxiduje, dochází k růstu tlaku. Když tlak dosáhne kritické hodnoty, povlak se poruší a vytrhá. Tento efekt sice úspěšně odstraňuje povlak, ovšem také poškozuje povrch substrátu [21] [9].

Další otázkou zůstává odpad. Většina odstraněného povlaku se vypaří. Kovové výpary mohou mít škodlivý účinek na lidský organismus. Při dlouhodobém vdechování mohou způsobit i vážné zdravotní potíže, například otravu kovem (kobaltem). Množství vdechnutých kovových částí zřejmě nebude tak velké, jako například při svařování. Drobný prach a ablační odpad je potřeba před novým povlakováním očistit [22]. Na povrchu se mohou také zachycovat kusy nataveného materiálu. Po vychladnutí pak tvoří velmi malé nežádoucí nečistoty na povrchu, které je nutno odstranit. Nečistoty zhoršují jakost povrchu a adhezi nového povlaku [26].

Při odstraňování povlaků z nástrojů laserem je důležitý úhel, pod kterým paprsek dopadá na povrch. Ideálním nastavením je kolmý dopad. Při snižujícím se úhlu se snižuje hloubka, ve které je paprsek efektivní. Zároveň se také snižuje velikost (průměr) ovlivněného bodu. Pokud dopadá paprsek pod ostrým úhlem, pak jedna hrana přijímá mnohem více energie než na hranu, která je tím pádem v menší vzdálenosti od zdroje (viz Obr. 30). Povlak se vypařuje

nerovnoměrně, čehož se může využívat například při čištění povrchu. Ve většině případů je však nerovnoměrná ablace nežádoucí [23].



Obr. 31 Vliv naklonění paprsku na hloubku odstraněné vrstvy. A – úhel 90, b – úhel 75°, c- úhel 60°, d – úhel 45° [23]

Při laser strippingu je třeba sledovat pohltivost daného povlaku a jak na něj vybraný laserový paprsek působí. Také je nutné udržovat čištěnou plochu bez drobných nečistot a zbytků povlaku. Nežádoucí je i dopad paprsku pod úhlem menším, než 90° a nerovnoměrná ablace. V průmyslových aplikacích se používá laserového čištění mastnot, korozních produktů a dalších nečistot. Laser stripping tvrdých povlaků se v průmyslu využívá pouze zřídka. Ačkoliv jsou testy technologie odstraňování tvrdých povlaků laserem úspěšné, zatím neexistuje sjednocený postup pro používání technologie [20].

4.5 Porovnání metod odstraňování povlaků

Laser stripping je tedy alternativní metoda pro odstraňování povlaků z řezných nástrojů, která má urychlit a zefektivnit renovaci nástrojů. Je ovšem důležité zhodnotit, zda se daná metoda skutečně vyplatí. Pro tuto technologii jsou charakteristické vstupní náklady – cena laserového zařízení, jeho seřízení, fokusace a nastavení optimálních parametrů. Dále je potřeba počítat s náklady spojenými s provozem zařízení. Proces je ale rychlý a výsledný povrch kvalitní.



	Otryskávání	Chemické	Elektrochemické	Iontový paprsek	Laser
Potřeba další úpravy	ano	ano, oplach	ano, oplach, pasivace	ne	ne
Stupeň přesnosti drsnosti	IT 12	IT 7	IT 7	IT 8	IT 5
Povlaky	4. gen.	4. gen. Mimo diamantových	všechny vodivé, převážně ty s obsahem Cr	PVD 4. gen.	4. gen.
Doba trvání	Jednotky až desítky minut	Dny až týdny	Minuty až desítky minut	Desítky minut až hodiny	Sekundy až minuty
Odpad	Otryskaný povlak + poškozené abrazivo	Těžko likvidovatelné roztoky a sloučeniny	Lázeň s rozpuštěnými prvky	Oxidy kovů ve formě prachu	Kovové výpary a přetavené částičky
Ekologičnost	Nezávadné	Odpadní lázeň – velká zátěž pro životní prostředí	Odpadní lázeň – zátěž pro životní prostředí	Nezávadné pro životní prostředí	Nezávadné pro životní prostředí
Minimální náklady Hodinový provoz [Kč]	Zařízení 200 000,- Abrazivo 2000,- na týden Provoz 550,-	Vana 150 000,- Lázeň 15 000,- Provoz 700,-	Vana + el. zdroj 200 000,- Provoz 650,-	Zařízení 10 mil Kč Provoz 4000,-	Zařízení 2 mil. Kč Provoz 2000,-

Tab. 3 Porovnání metod odstraňování povlaků [27]

Uvedené náklady jsou orientační. V závislosti na typu přístroje či nástrojů mohou být ceny i několikanásobně vyšší. Každá metoda má své výhody i nevýhody. Otryskávání je levná a rychlá metoda, která povlak odstraní však velmi hrubě a nedokonale. Výsledný povrch má vysokou drsnost povrchu a zůstávají na něm zbytky povlaku. Chemická metoda odstraní povlak dokonale a s dobrou kvalitou výsledného povrchu. Nicméně roztok chemikálií v odpovlakovací vaně se těžko likviduje a velké množství tohoto roztoku je ekologickou zátěží. Po odstranění povlaku se musí nástroj oplachovat. U multivrstvých povlaků je situace náročnější, každá vrstva má jiné vlastnosti a musí být odstraněna v jiné lázni. To přináší další náklady a prodlužuje celkovou dobu odstranění povlaku. DLC povlaky jsou vůči většině chemikálií téměř nereaktivní. Chemikálie se také dostávají pod povlak pomocí nedokonalostí a pórů v povlaku. Elektrochemická metoda má podobné problémy jako metoda chemická, je ale výrazně rychlejší. K základním nákladům je kromě vany připočten i elektrický zdroj, který cenu zvyšuje

o patnáct a více tisíc. Odstraňování povlaku iontovým paprskem je poměrně rychlé a s dobrým výsledným povrchem. Zařízení je však velice drahé (desítky milionů), proto se běžně nevyužívá. Laserová metoda je velice rychlá a vytváří kvalitní povrch. Zařízení lze pořídit za cenu od dvou milionů výše. Laser potřebuje velký výkon, proto je nákladný i provoz, řádově v tisících korunách (viz Tab 2). [27]

V průmyslových podnicích se nejčastěji používá metoda chemická nebo elektrochemická, z důvodu malé hodnoty výsledné drsnosti a možnosti odstraňovat povlak z mnoha nástrojů najednou [3]. Mechanické tryskání se používá méně, nejčastější využití je základní, hrubé otryskání nástrojů. Iontovým paprskem je také možné dosáhnout malé hodnoty drsnosti, nicméně se téměř nepoužívá kvůli vysokým nákladům [3]. V souvislosti odstraňování povlaků se laser aplikuje nejvíce na čištění korozních produktů a jiných nečistot. Další aplikace laseru (laser stripping) postupně získávají více pozornosti v průmyslových podnicích. Laser stripping má potenciál být rychlejší než používané metody odstraňování povlaků. Rychlejší odstranění povlaku přispěje k celkovému zproduktivnění a zlevnění procesu renovace nástroje. Při laser strippingu se dosahuje dobrých hodnot výsledné drsnosti povrchu [17].

5 Experiment

Cílem experimentální části bakalářské práce je nalezení parametrů pro maximální produktivitu metody laser strippingu. Je potřeba naleznout nejkratší dobu, za kterou je povlak ze substrátu bezpečně odstraněn. Také bude zohledněna výsledná drsnost jednotlivých odstraněných povrchů. Výsledkem experimentu je odstranění povlaku ze substrátu laserovým paprskem tak, aby výsledná plocha měla malou hodnotu drsnosti a zároveň co nejkratší pracovní čas. Důvodem provedení experimentu je úmysl zefektivnit proces odstraňování ochranných povlaků. Experiment proběhl na jednom laserovém zařízení. Předmětem experimentu byly dva odlišné povlaky, dodané firmou AdvaMat s.r.o.

5.1 Popis experimentu

Experiment zaměřující se na laserovou ablaci vybraných povlaků pro řezné nástroje byl proveden na laserovém zařízení LD50s, který patří Ústavu výrobních strojů a zařízení Fakulty strojní ČVUT v Praze. Jmenovité parametry



laseru LD50S jsou v Tab. 3.

značení	LD50s
Typ	Nd:YAG
Vlnová délka [nm]	1064
Průměrný výkon [W]	50
Špičkový výkon [MW]	11
Hustota energie pulsu [J·cm ⁻²]	1÷12
Délka pulsu [ns]	120
Průměr svazku [mm]	0,1
Frekvence [kHz]	max 50
Využitelné pro technologie:	gravírování, popis

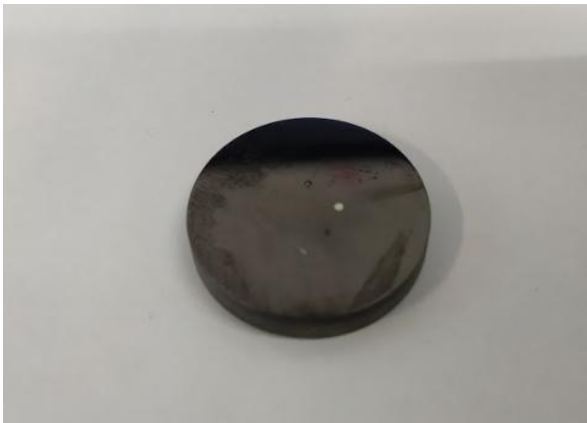
Obr. 32 Laserové zařízení LD50s

Tab. 4 Jmenovité parametry laseru
LD50s

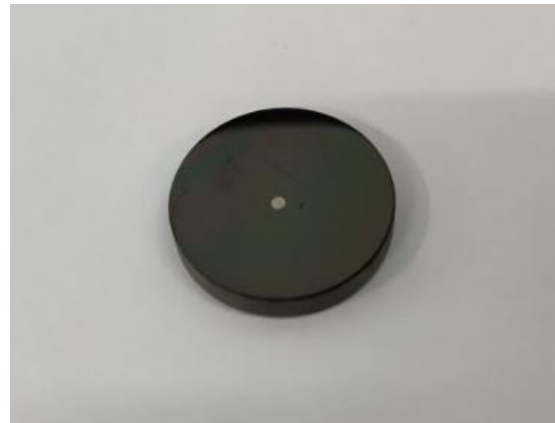
Vlivem opotřebení laserového zdroje byl maximální výkon laserového zařízení omezen na 37 W. Maximální rychlost rozmítání pulsů je 3000 mm·s⁻¹.

V rámci práce byla testována technologie odstraňování ochranných povlaků laserem na dvou typech povlaků. První testovaný povlak je

pojmenován HPX Booster, prvkové složení je AlTiN. Povlak HPX má tloušťku 3,2 μm a tvrdost cca 3300 HV [29]. Druhým otestovaným povlakem byl vícevrstvý diamantový povlak DLC C. Základní vrstva povlaku o tloušťce 1,3 μm je tvořena vrstvou CrN. Druhá, finální vrstva je tvořena a-C:H. Druhá vrstva má tloušťku 1,2 μm . Celková tloušťka povlaku DLC C je 2,5 μm a má tvrdost cca 800 HV [29]. Povlak DLC C se používá na kluzné kontakty, jeho součinitel tření proti oceli je 0,08. Oba povlaky byly nanášeny na oceli X155CrVMo12 (19 573 ČSN). Vzorky jsou tvaru kruhu, o průměru 25 mm a výšce 4,4 mm.



Obr. 33 fotografie původního povrchu povlaku HPX Booster



Obr. 34 fotografie původního povrchu povlaku DLC C

Výsledné plochy po stripování byly nasnímány na optickém mikroskopu od firmy Heiscope s objektivem Navitar, patřící Ústavu výrobních strojů a zařízení Fakulty strojní. Dále byly plochy vyfoceny 3D profiloměrem NewView 7200 od firmy Zygo, který náleží Katedře řídicí techniky Fakulty elektrotechnické ČVUT v Praze. Přístroj pracuje s koherentní skenovací interferometrií. Ta spočívá v ozařování povrchu paprskem bílého složeného světla. Světlo se při srážce s překážkou (nerovnoměrností v povrchu) láme a difraktuje. Výsledný signál je složen z dopadajících, lomených a odražených paprsků. Zařízení přijme signál a vytvoří model odpovídající skutečnému povrchu.

5.2 Test na povlaku HPX Booster

Díky spolupráci na projektu „Nové nanostruktury pro inženýrské aplikace umožněné kombinací moderních technologií a pokročilých simulací“ byly Ústavu výrobních strojů a zařízení externím výrobcem řezných nástrojů

poskytnuty otestované parametry laseru (viz. Tab. 4). Těmito parametry byl povlak AlTiN bezpečně odstraněn. Parametry prvního vlastního experimentu pro laser stripping byly nastaveny tak, aby měly oba experimenty stejnou hustotu energie, a to $F = 6,15 \text{ [J}\cdot\text{cm}^{-2}]$. Výsledné povrchy byly nasnímány na optickém mikroskopu zvětšením 229x.

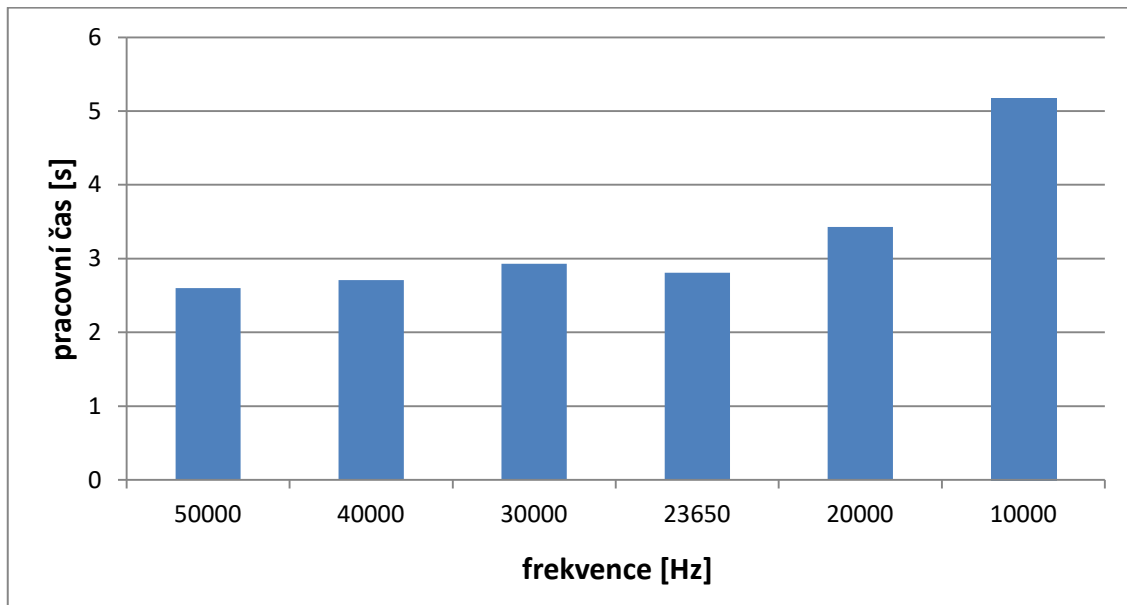
		Parametry výrobce řezných nástrojů	Vlastní parametry	Poznámka
λ	[nm]	1064	1064	Vlnová délka
τ_p	[ns]	100	120	Délka pulsu
d	[μm]	45,5	180	Laser spot (průměr svazku)
P	[W]	20	37	Reálný průměrný výkon
f_p	[kHz]	200	23,65	Frekvence pulsu
E_p	[μJ]	100	1086,9	Energie v pulsu
F	[$\text{J}\cdot\text{cm}^{-2}$]	6,15	6,15	Hustota energie
S_p	[%]	70	70	Překrytí pulsů
H	[%]	170	170	Překrytí šrafů
v_f	[$\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$]	2730	1277	Rychlost rozmítání
p_y	[mm]	0,01365	0,054	Rozteč šrafů

Tab. 5 Laser stripping, spolupracující firma vs. vlastní nastavení

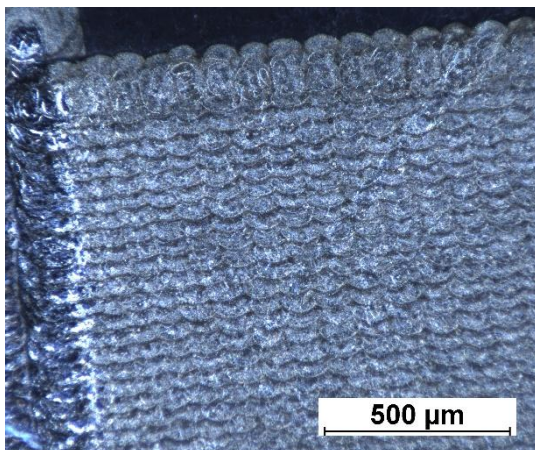
V experimentu byla hledána maximální produktivita pro úplné odstranění povlaku z povrchu vzorku. Test byl proveden s maximálním výkonem laseru LD50s. Maximální výkon byl použit proto, aby byla vysoká energie v jednom pulsu. S vyšší energií se zvyšuje pravděpodobnost odstranění povlaku jedním přejezdem plochy laserovým paprskem. Poté byla snižována frekvence. Byl měřen čas působení laseru, a to pomocí operačního softwaru (WMark) a stopkami. Před samotným experimentem byla změřena velikost laserového svazku 0,18 mm. Dále byla kalotestem změřena tloušťka povlaku – 3,2 μm .

Test č.		1	2	3	4	5	6
Zdrojová data	Výkon [W]	25	37	37	37	37	37
	Frekvence [Hz]	23650	50000	40000	30000	20000	10000
	Energie v pulsu [μJ]	1564	740	925	1620	1850	3700
	Hustota energie [$\text{J}\cdot\text{cm}^{-2}$]	6,15	2,91	3,64	4,85	7,27	14,54
	Rychlost [$\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$]	1277,1	2700	2160	1620	1080	540
	Překryv pulsů [%]	35	35	35	35	35	35
	Překryv pulsů do boku [%]	70	70	70	70	70	70
Měření	Čas na 1 cm^2 [s] software	2,81	2,6	2,71	2,93	3,43	5,18
	Čas na 1 cm^2 [s] stopky	3,5	3,18	3,4	3,27	4,05	5,98
	Čas na 9 cm^2 [s] software	15,12	10,6	12,6	14,9	20,78	38,29
	Čas na 9 cm^2 [s] stopky	16,1	11,5	13,2	15,7	21,3	39,4

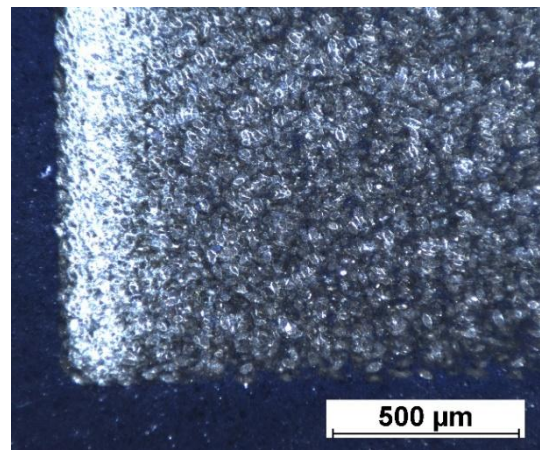
Tab. 6 Laser stripping pro maximální produktivitu, povlak HPX Booster



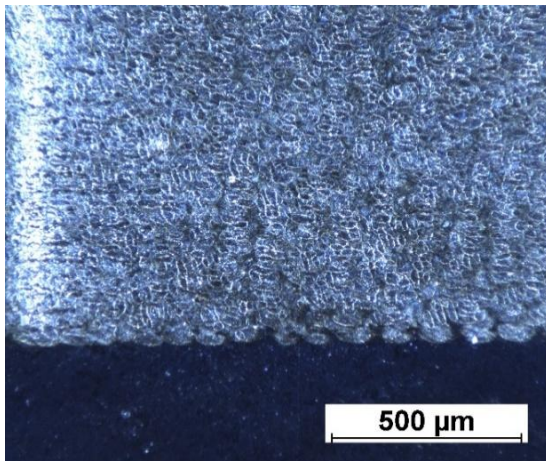
Obr. 35 Graf znázorňující vliv frekvence na pracovní čas při laser strippingu, testy č. 1-6



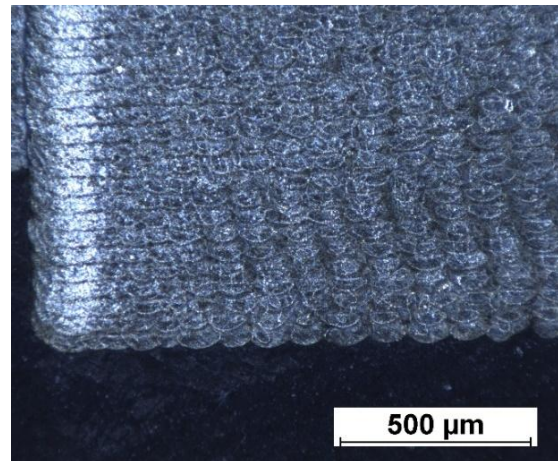
Obr. 36 Mikroskopický snímek povrchu test č. 1



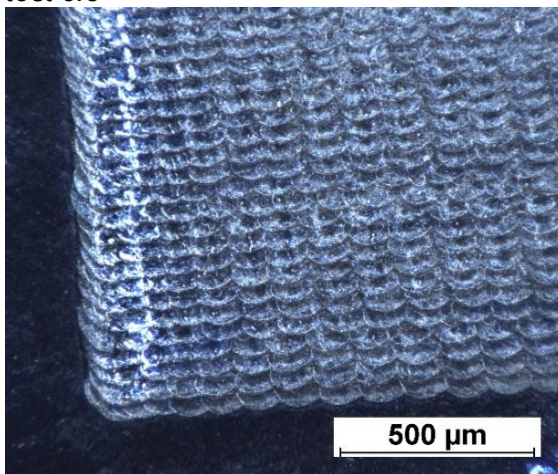
Obr. 37 Mikroskopický snímek povrchu test č. 2



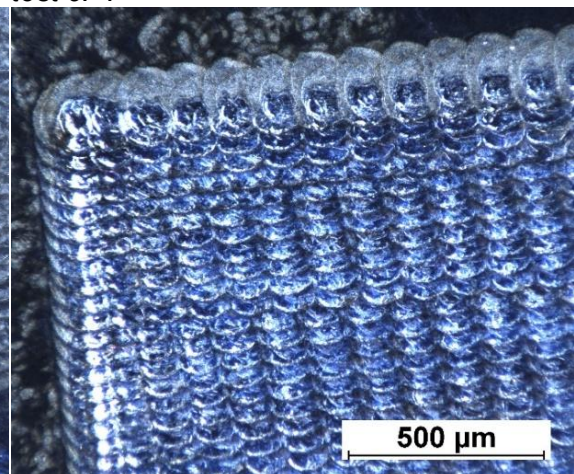
Obr. 38 Mikroskopický snímek povrchu test č.3



Obr. 39 Mikroskopický snímek povrchu test č. 4



Obr. 40 Mikroskopický snímek povrchu test č. 5

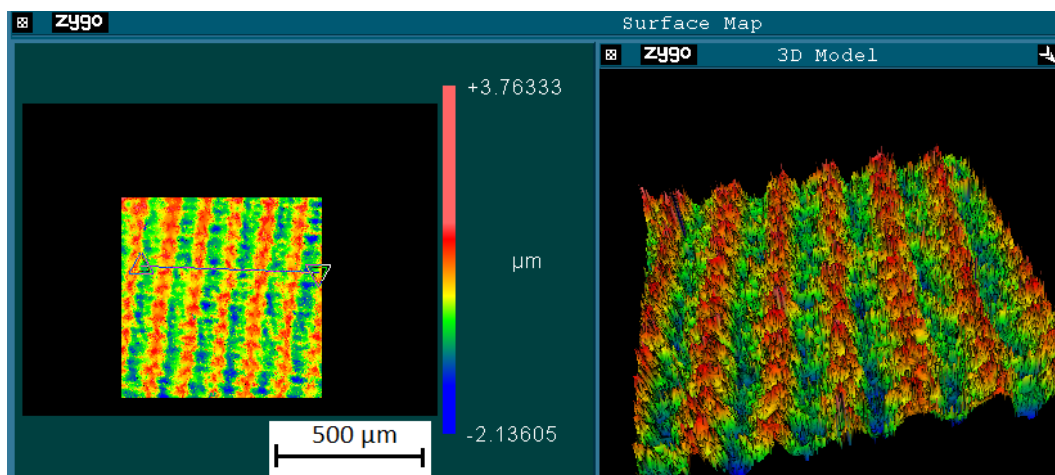


Obr. 41 Mikroskopický snímek povrchu test č.6

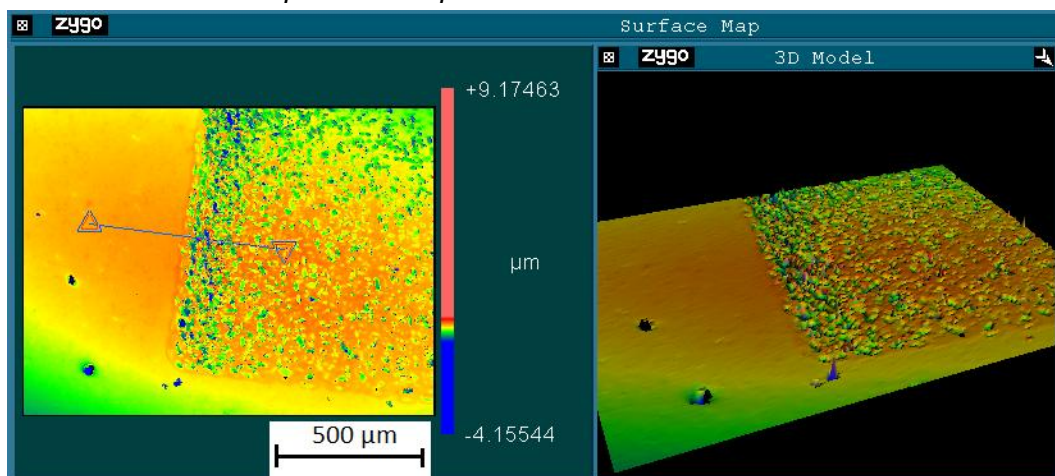
Z tabulky je patrné, že měření stopkami má velkou spínací prodlevu. Jako směrodatný strojní čas bude tedy brán ten naměřený pomocí softwaru WMark. Pro nejvyšší produktivitu procesu je nastaven maximální výkon (37 W) a maximální frekvence (50 kHz) (viz Tab. 5 – test 2). Vlivem vysoké frekvence je v jednom pulsu málo energie. Povrch je sice souměrně ovlivněn, ale povlak není kompletně odstraněn. Na použitém laserovém zařízení nelze dosáhnout větší rychlosti rozmítání paprsku než $3000 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$. Na snímcích 1,5 a 6 je patrný překryv pulsů. Ačkoliv parametry byly nastaveny tak, aby se pulsy překrývaly ze 70 %, v jedné řadě je překryv poloviční. To je pravděpodobně dané tím, že zdroj laserového zařízení při vyšší frekvenci nezvládá dodávat potřebnou energii do každého pulsu. Proto generuje méně pulsů. Tato vlastnost byla předmětem dalšího zkoumání. Bylo zjištěno, že pro frekvence nižší než 10 kHz skutečná rychlost laserového paprsku odpovídá té vypočtené.

Ze série fotografií experimentů je vidět, že pouze v případě testu č. 6 je povlak skutečně odstraněn, tj. lze pozorovat základní materiál. Na fotografii jsou vidět odlesky oceli. Většina výsledných stripovaných ploch má také na jedné straně odstraněnou ocel do větší hloubky, než zbytek stripované plochy. Na fotografiích je tento prvek vidět jako lesklý pruh na levé straně stripované plochy. To je zapříčiněno rozběhem galvo hlavy, kdy zrcátka odrážející paprsek zrychlují z nulové rychlosti, tedy pulsy se zde překrývají více. Tento nežádoucí efekt lze odstranit tím, že naprogramovaná plocha, na které paprsek působí, bude větší než plocha, na které je potřeba odstranit povlak.

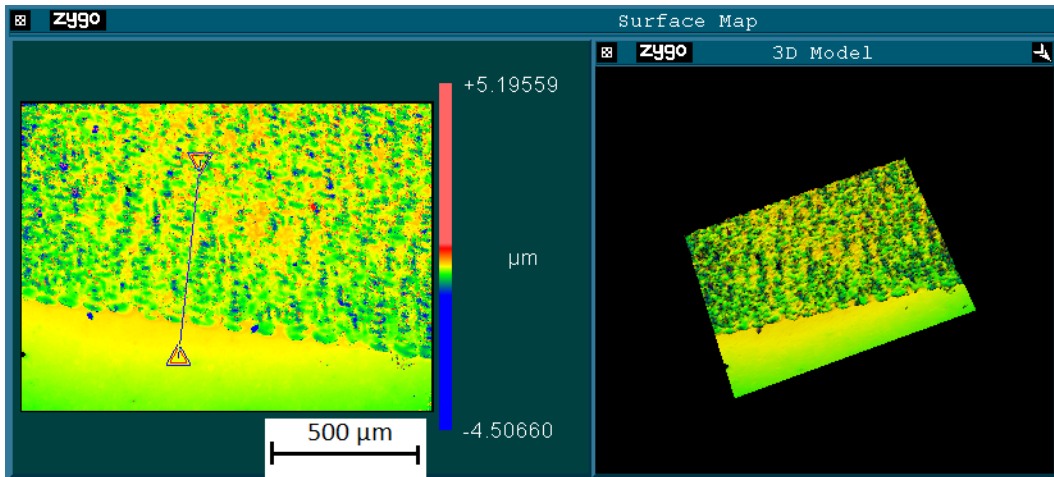
Testovací vzorky testů č.1-6 byly dále nasnímány na 3D profiloměru. Na snímcích je možno vidět ošetřeného povrchu oproti původnímu povlaku (značen žlutou a červenou barvou), který má na stupnici hodnotu 0 μm .



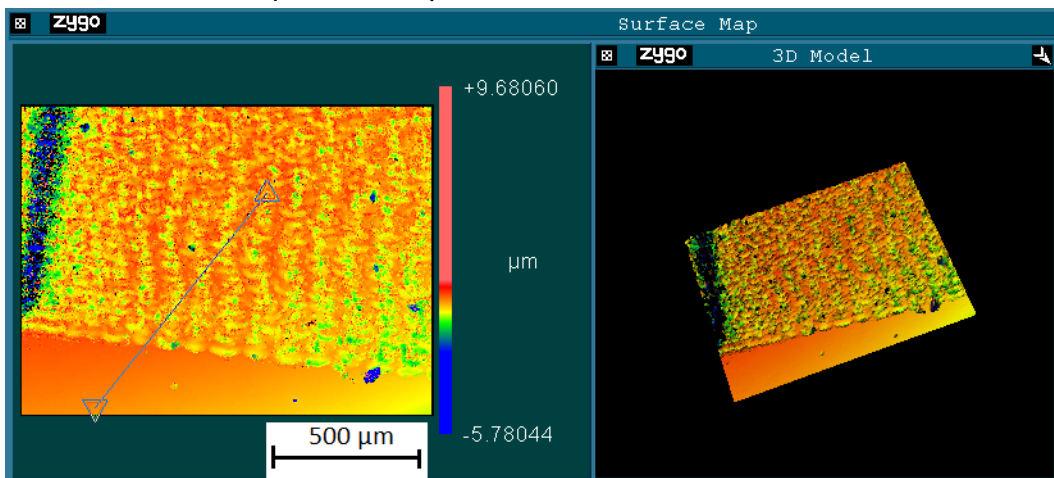
Obr. 42 Snímek z 3D profiloměru povrchu test č.1



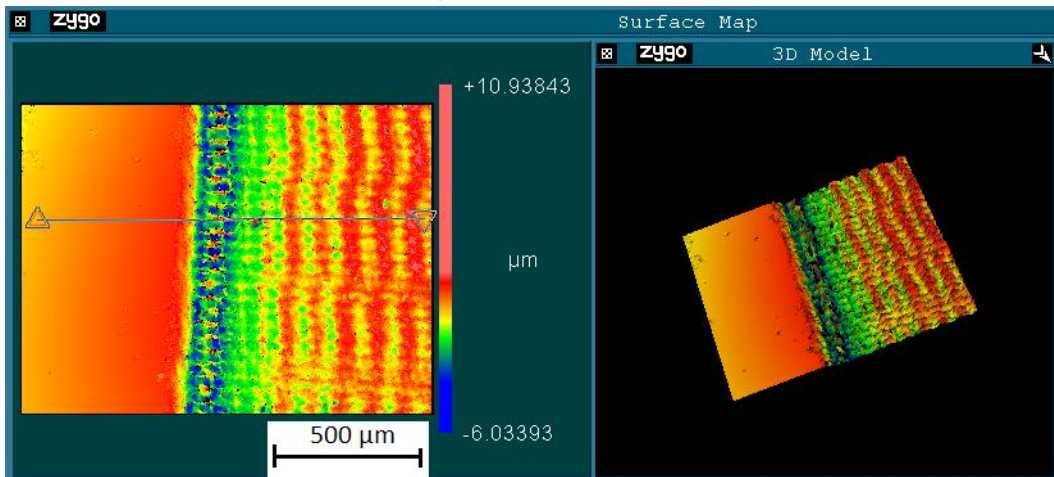
Obr. 43 Snímek z 3D profiloměru povrchu test č. 2



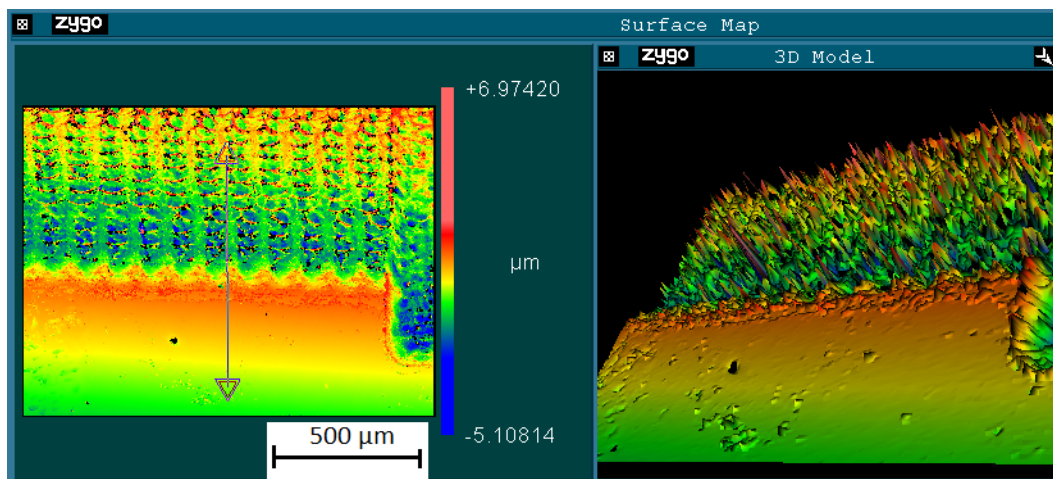
Obr. 44 Snímek z3D profiloměru povrchu test č. 3



Obr. 45 Snímek z 3D profiloměru povrchu test č. 4



Obr. 46 Snímek z 3D profiloměru povrchu test č. 5



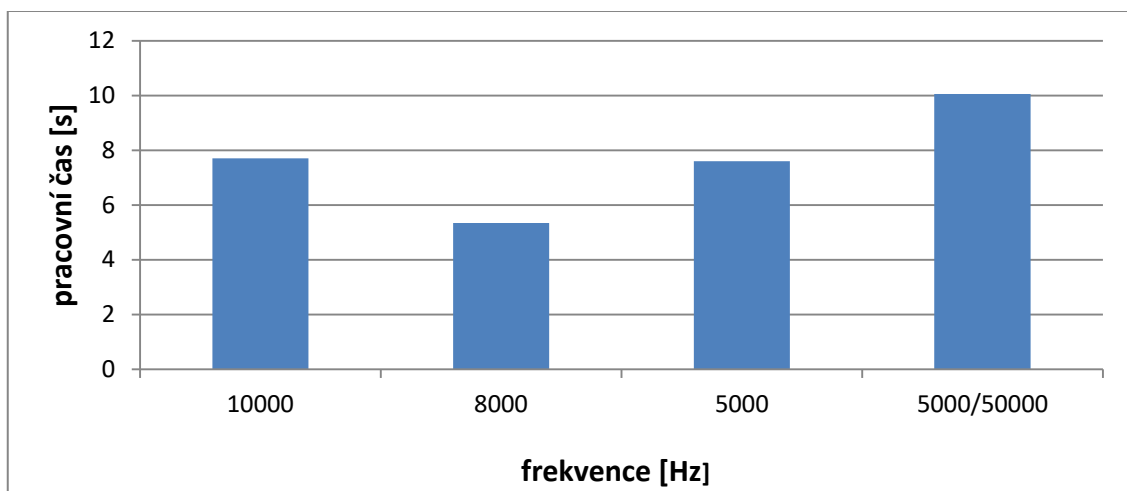
Obr. 47 Snímek z 3D profiloměru povrchu test č. 6

I z těchto snímků je patrné, že největší část povlaku byla odstraněna v případě testu č. 6 – frekvence 10 kHz, výkon 37 W, fluence $14.5 \text{ J}\cdot\text{cm}^{-2}$. Ovšem i zde zůstávají špice materiálu. To může být dáno nedostatečným překryvem, nebo přetavením, vytlačáním a opětovným ztuhnutím páleného materiálu. Další z možností vysvětlení domnělého zbytku materiálu na povrchu je nevhodná metodika mikroskopického snímání. Odlesky povrchu (Obr. 28) mohou způsobovat nepřesnost při měření zbytku povlaku na nástroji.

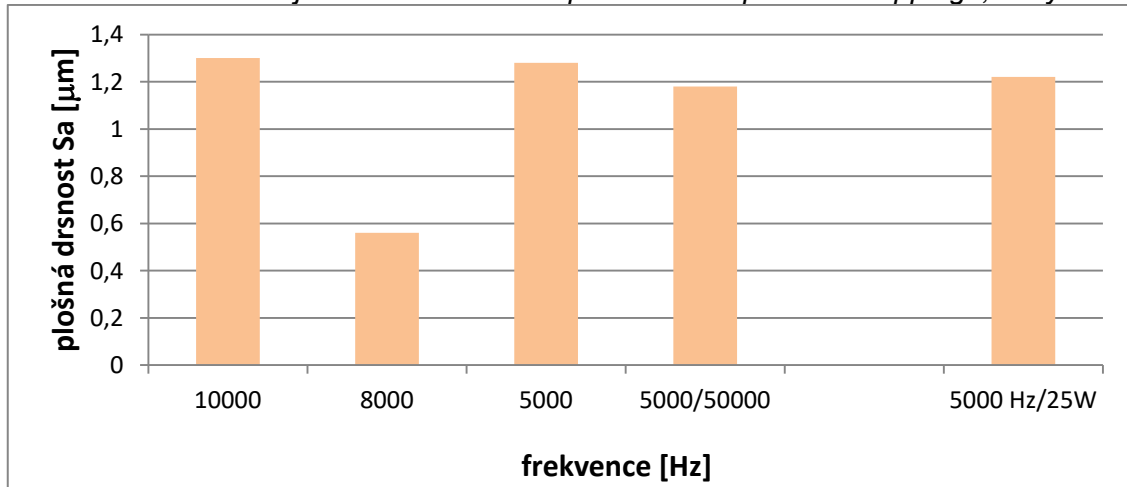
V testech č. 1-6 se ukázalo, že pulsy o vysoké frekvenci nemají dostatek energie, aby byl povlak odstraněn. Proto testy (č. 7-11) byly provedeny se snížením frekvence pod 10 kHz. Tím bylo dosaženo vyšší energie v pulsu za cenu delší doby procesu. Také byla upravena rychlost tak, aby překryv pulsů byl 70 % v obou osách. Dále byla pomocí 3D profilometru změřena průměrná tloušťka odstraněné vrstvy, plošná drsnost S_a a největší výška profilu R_z .

Test č.		7	8	9	10		11
Zdrojová data	Výkon [W]	37	37	37	37	37	25
	Frekvence [Hz]	10000	8000	5000	5000	50000	5000
	Energie v pulsu [μJ]	3700	4625	7400	7400	740	5000
	Hustota energie [$\text{J}\cdot\text{cm}^{-2}$]	14,54	18,18	29,08	29,08	2,91	19,65
	Rychlost [$\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$]	270	432	270	270	2700	270
	Překryv pulsů [%]	70	70	70	70	70	70
	Překryv pulsů do boku [%]	70	70	70	70	70	70
Naměřená data	Čas na 1 cm^2 [s] software	7,7	5,34	7,6	7,6	2,45	7,7
	Průměrná hloubka odstraněné vrstvy [μm]	3,1	3,3	4,5	4,6		4,5
	Maximální hloubka odstraněné vrstvy [μm]	7	7,4	5,4	8		7,8
	Průměrná aritmetická výška profilu Sa [μm]	1,3	0,56	1,28	1,18		1,22
	Největší výška profilu Rz [μm]	6,3	3,2	6,9	5,5		5,6

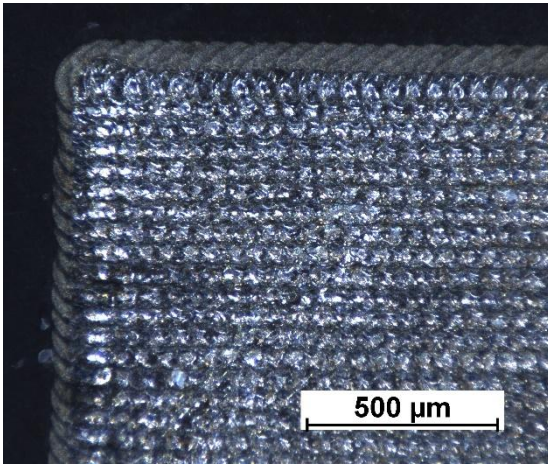
Tab. 7 Laser stripping pro nízkou frekvenci, povlak HPX Booster



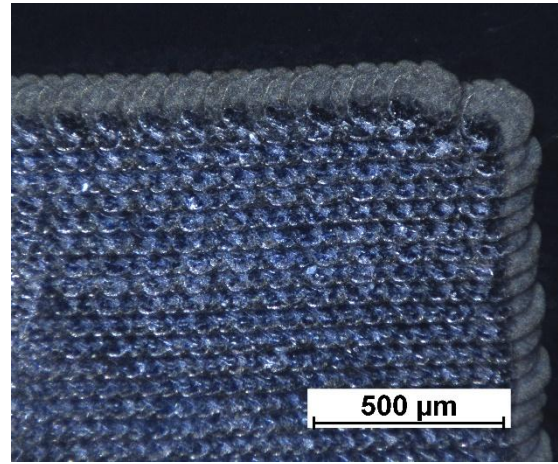
Obr. 48 Graf znázorňující vliv frekvence na pracovní čas při laser strippingu, testy č. 7-11



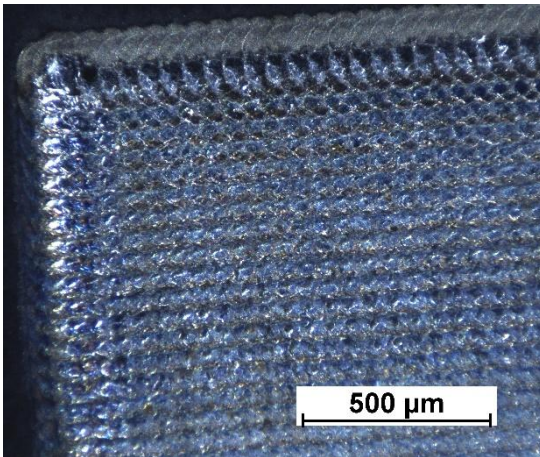
Obr. 49 Graf znázorňující vliv frekvence na plošnou drsnost výsledného povrchu Sa při laser strippingu, testy č. 7-11



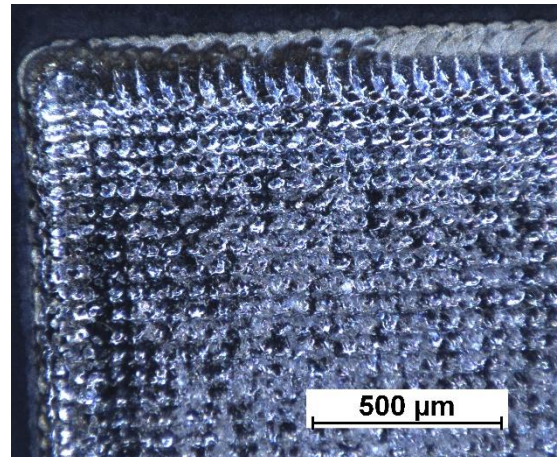
Obr. 50 Mikroskopický snímek povrchu test č.7



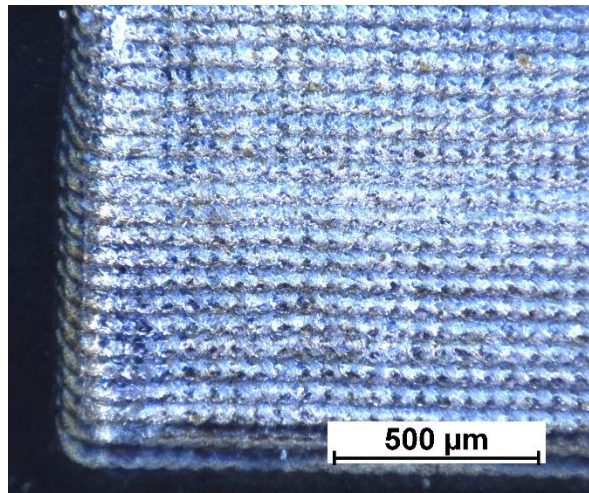
Obr. 51 Mikroskopický snímek povrchu test č. 8



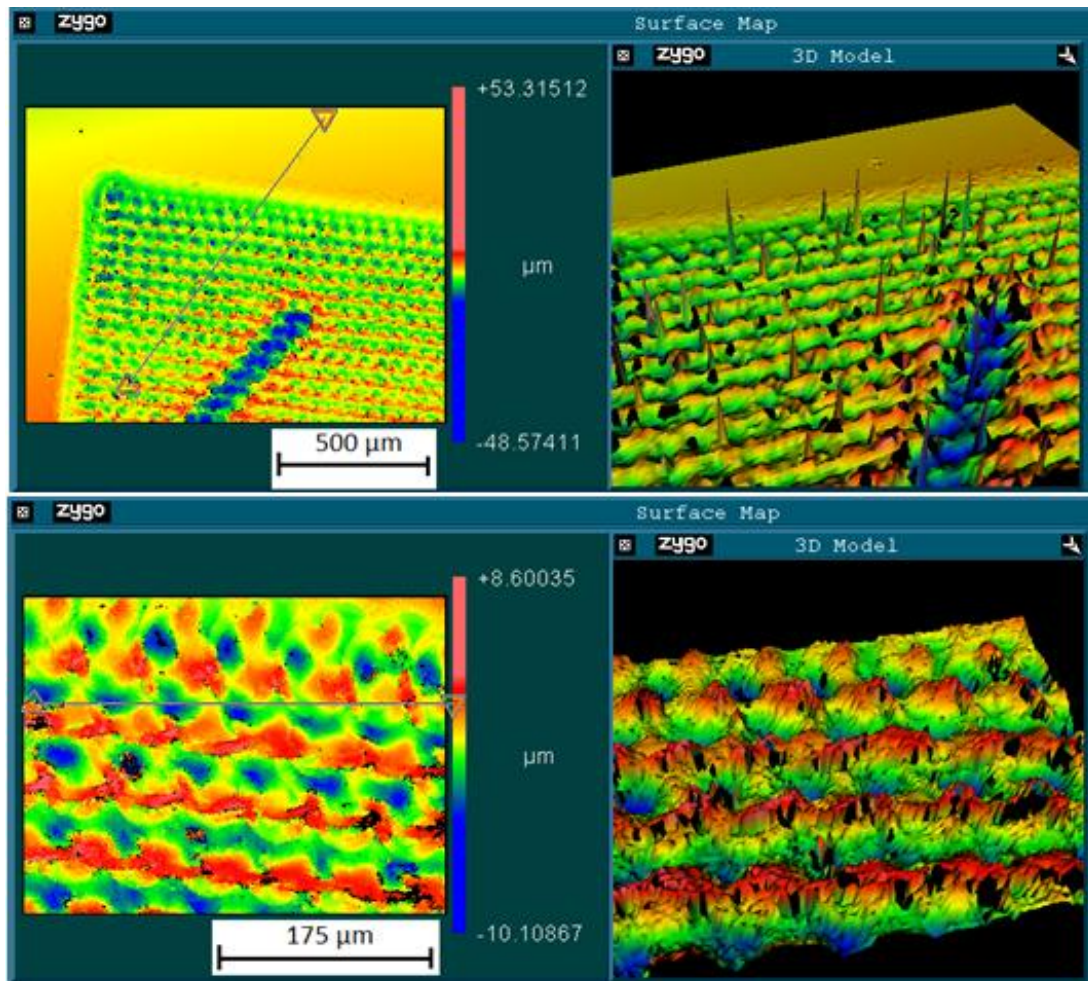
Obr. 52 Mikroskopický snímek povrchu test č.9



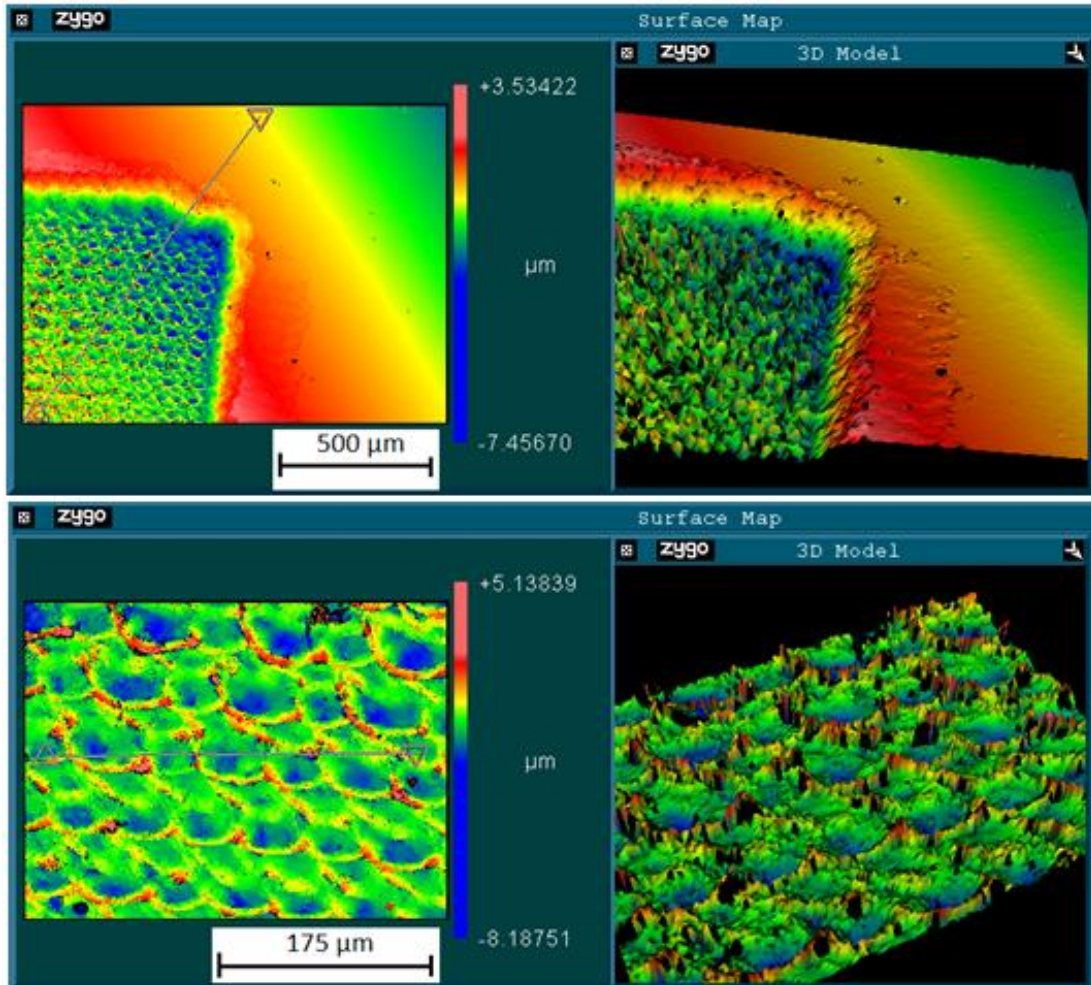
Obr. 53 Mikroskopický snímek povrchu test č.10



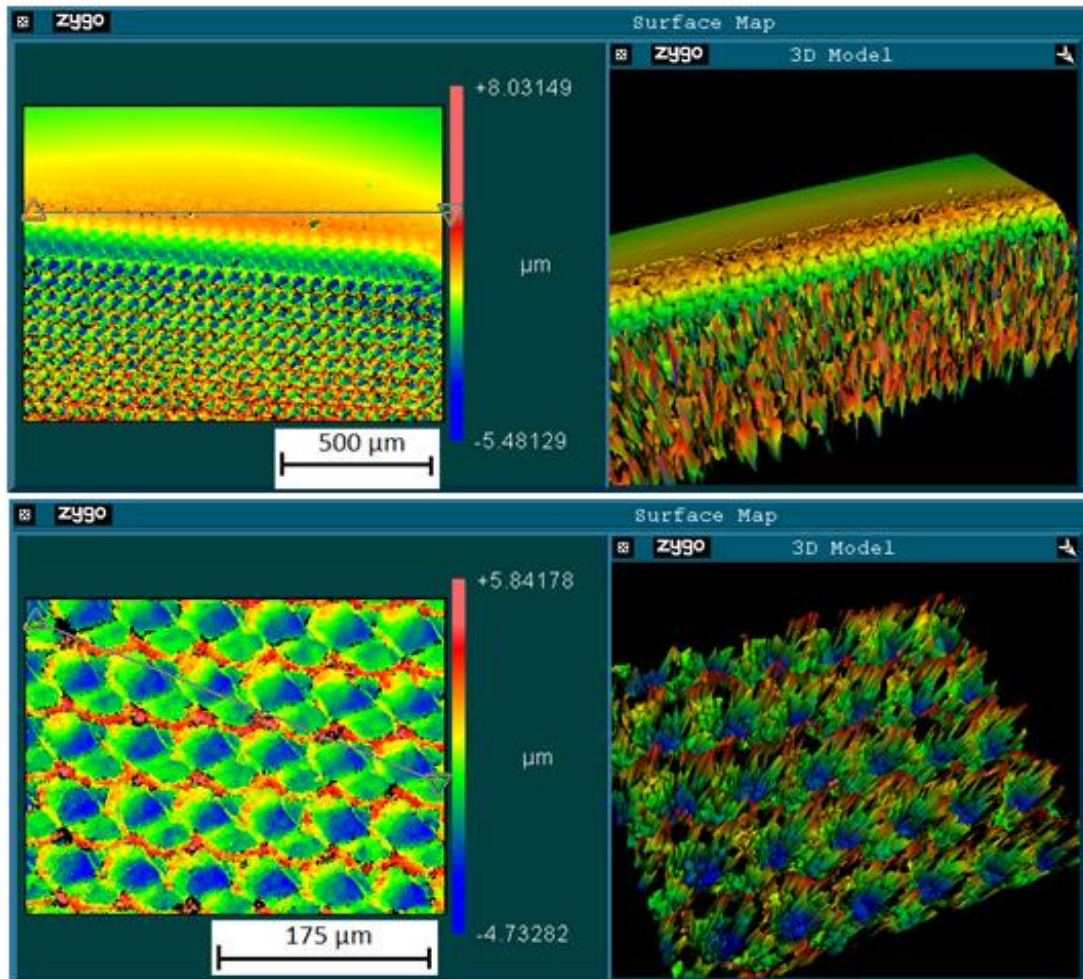
Obr. 54 Mikroskopický snímek povrchu test č. 11



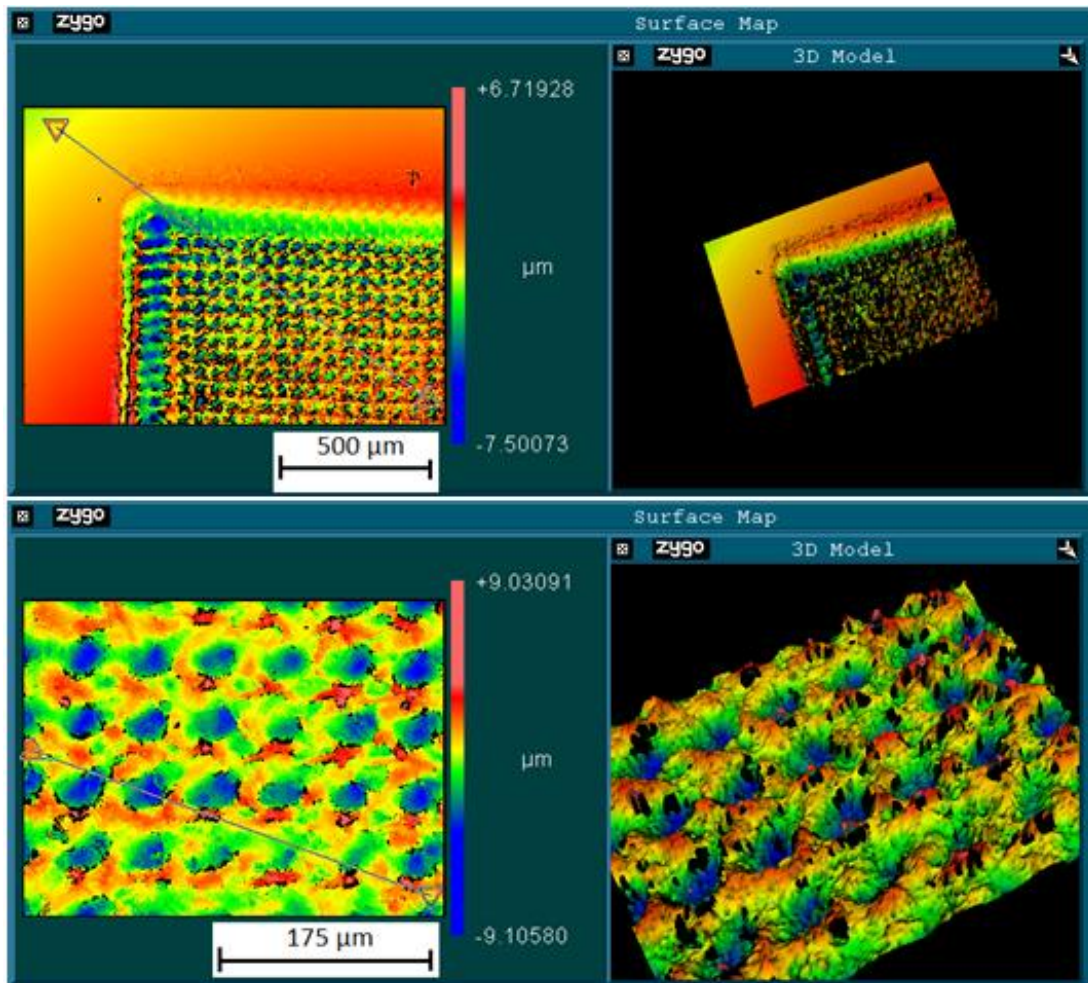
Obr. 55 – Snímky z 3D profilometru pro měření hloubky a drsnosti povrchu, test č.7



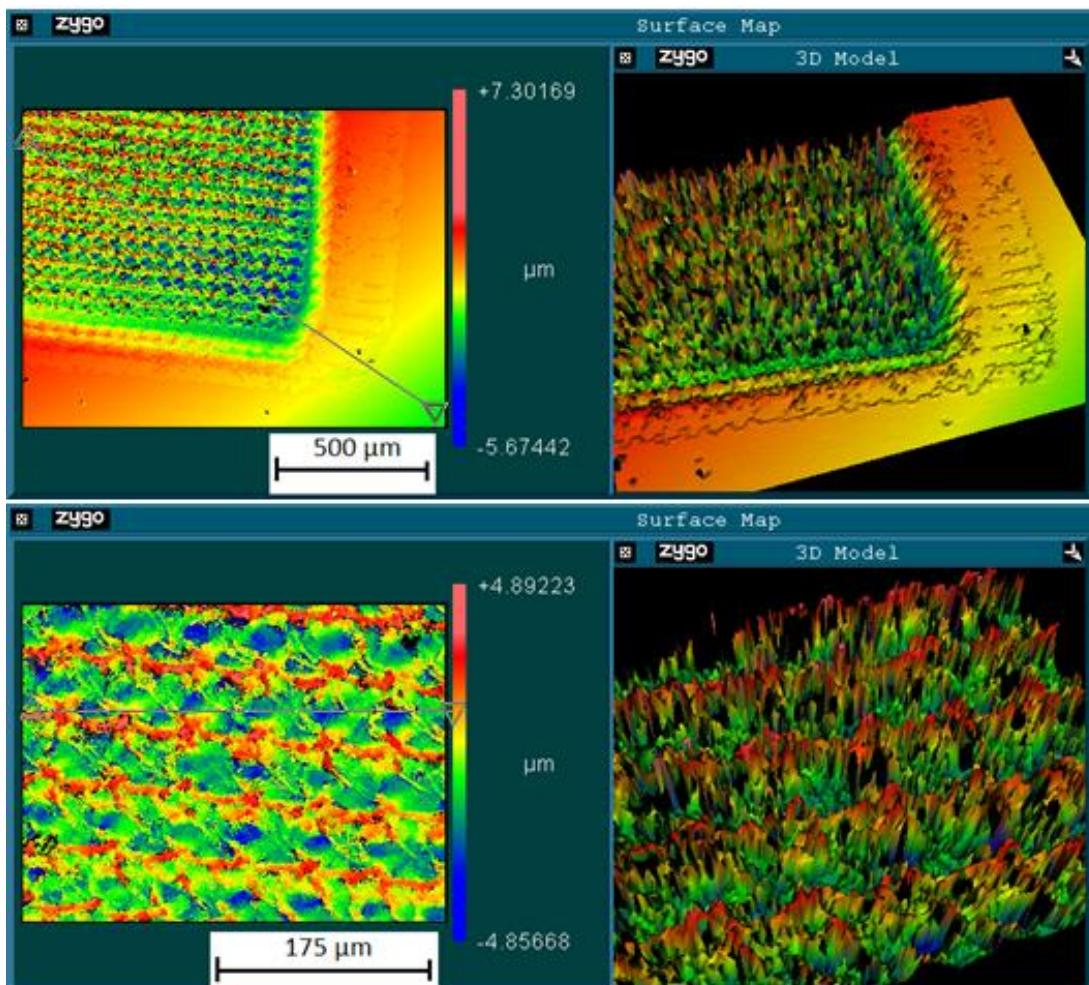
Obr. 56 - Snímky z 3D profilometru pro měření hloubky a drsnosti povrchu, test č. 8



Obr. 57 - Snímky z 3D profilometru pro měření hloubky a drsnosti povrchu, test č.9



Obr. 58 Snímky z 3D profilometru pro měření hloubky a drsnosti povrchu, test č. 10



Obr. 59 Snímky z 3D profilometru pro měření hloubky a drsnosti povrchu, test č.11

Z naměřené hloubky, drsnosti a obrazu je patrné, že nejlepším výsledkem je povrch ošetřený parametry 8, tedy frekvence 8 kHz, 37W při překryvu pulsů 70%. Průměrná hloubka je 3,3 μm , povlak o tloušťce 3,2 μm je bezpečně odstraněn a základní materiál není masivně poškozen. Výsledná průměrná plošná odchylka profilu Sa je 0,56 μm . Výsledná maximální výška nerovnoměrnosti povrchu Rz je 3,2 μm .

Pokus č. 10 byl proveden se záměrem snížení drsnosti povrchu pomocí vysokofrekvenčních pulsů (50 kHz). Plošná drsnost Sa se zmenšila o 7%, z 1,28 μm na 1,18 μm . Maximální výška profilu se zmenšila z Rz 6,9 μm na 5,5 μm . Z toho vyplývá, že je možné pomocí rychlých pulsů vylepšit drsnost povrchu (viz. Tab. 6).

5.2.1 Analýza testů na povlaku HPX Booster

Na povlaku HPX Booster (AlTiN) bylo provedeno 11 testů. Test č.1, který vycházel z testů výrobce řezných nástrojů, neodstranil povlak v potřebné

tloušťce. V testech č. 2-5 s frekvencí vyšší než 10 kHz neměly pulsy dostatečnou energii a povlak byl ovlivněn jen povrchově. Při testu č. 6 byl povlak odstraněn, s dobou odstranění 1 cm² povlaku 5,18s. Během testů 7-11 byl povlak odstraněn pokaždé. Nejmenší hodnoty drsnosti bylo dosaženo parametry testu č. 8, doba odstranění 1 cm² povlaku byla 5,34 s.

Optimální parametry pro ústavní laserové zařízení na odstranění povlaku HPX Booster o tloušťce 3,2 μm z oceli jsou v tabulce 7.

Zdrojová data	Výkon [W]	37
	Frekvence [Hz]	8000
	Energie v pulsu [μJ]	4625
	Hustota energie [J·cm ⁻²]	18,18
	Rychlost [mm·s ⁻¹]	432
	Překryv pulsů [%]	70
	Překryv pulsů do boku [%]	70
Naměřená data	Čas na 1 cm ² [s] software	5,34
	Průměrná hloubka odstraněné vrstvy [μm]	3,3
	Maximální hloubka odstraněné vrstvy [μm]	7,4
	Průměrná aritmetická výška profilu Sa [μm]	0,56
	Největší výška profilu Rz [μm]	3,2

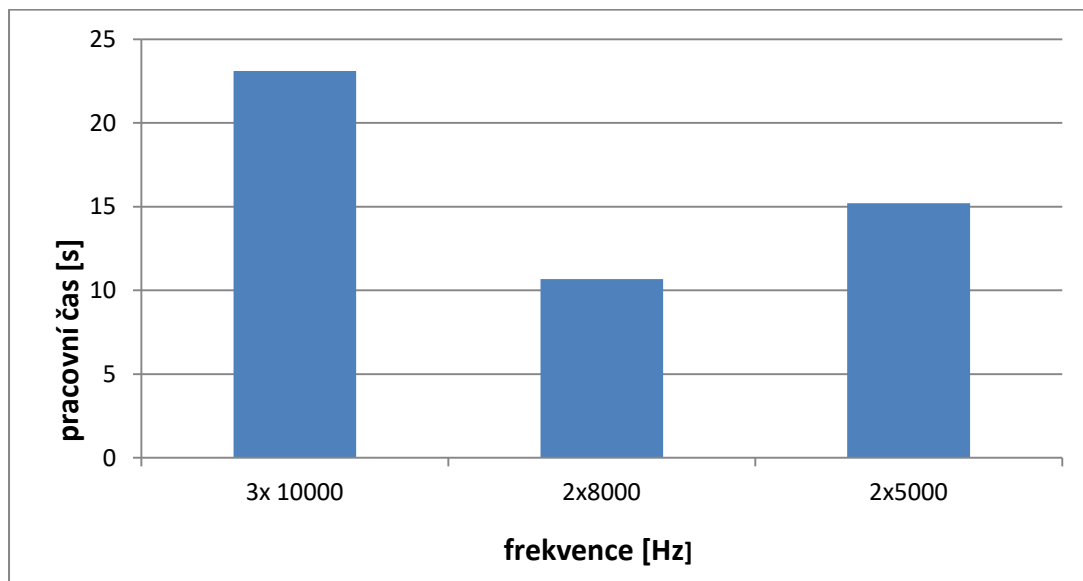
Tab. 8 Optimální parametry pro laser stripping AlTiN povlaku

5.3 Test na povlaku DLC C

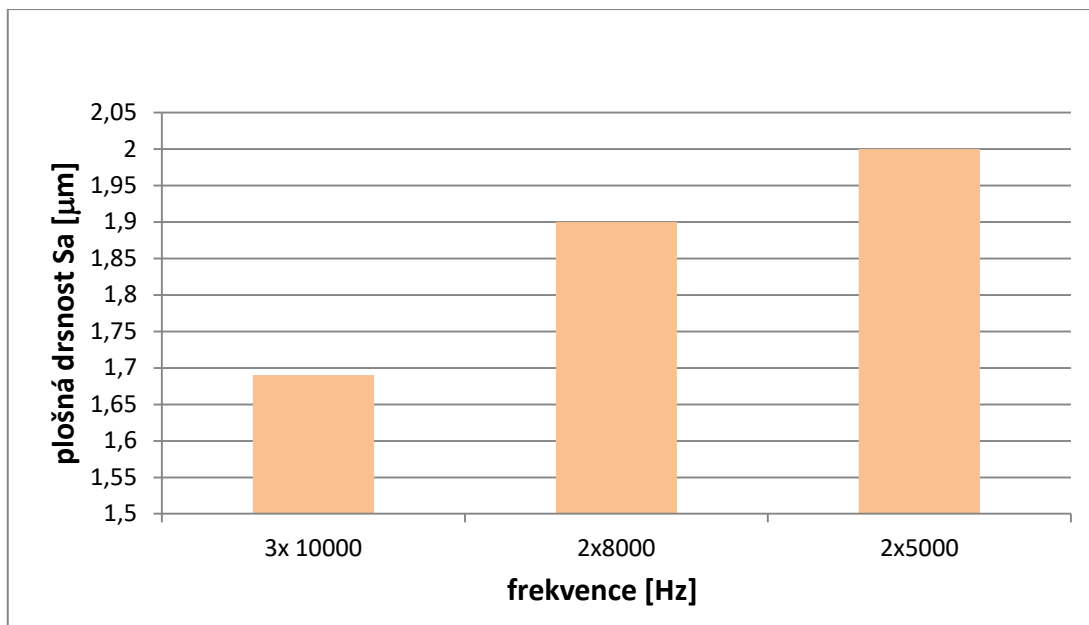
Při prvních testech na DLC povlaku byla uvažovaná vyšší odolnost tohoto povlaku oproti AlTiN povlaku. V odborné publikaci z rešerše i v poskytnutých datech od výrobce řezných nástrojů bylo vždy nutné použít více přejezdů jedné plochy, aby byl povlak odstraněn. Pro odstranění DLC povlaku je tedy potřeba větší energie, než pro předchozí povlak. Z těchto informací byl navržen následující experiment. Frekvence byla nastavena na 10 kHz a nižší, výkon nastaven maximální a překryv pulsů nastaven na 70%.

Test č.		C1		C2		C3		
Zdrojová data	Výkon [W]	37	37	37	37	37	37	37
	Frekvence [Hz]	8000	8000	5000	5000	10000	10000	10000
	Energie v pulsu [μJ]	4625	4625	7400	7400	3700	3700	3700
	Hustota energie [$\text{J}\cdot\text{cm}^{-2}$]	18,18	18,18	29,08	29,08	14,54	14,54	14,54
	Rychlost [$\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$]	432	432	270	270	540	540	540
	Překryv pulsů [%]	70	70	70	70	70	70	70
	Překryv pulsů do boku [%]	70	70	70	70	70	70	70
Naměřená data	Čas na 1 cm^2 [s] software	7,6	2,45	7,6	7,6	7,7	7,7	7,7
	Průměrná hloubka odstraněné vrstvy [μm]	3,8		5		4		
	Maximální hloubka odstraněné vrstvy [μm]	7,2		8,1		7,6		
	Průměrná aritmetická výška profilu Sa [μm]	1,69		1,9		2		
	Největší výška profilu Rz [μm]	6		8,6		6,5		

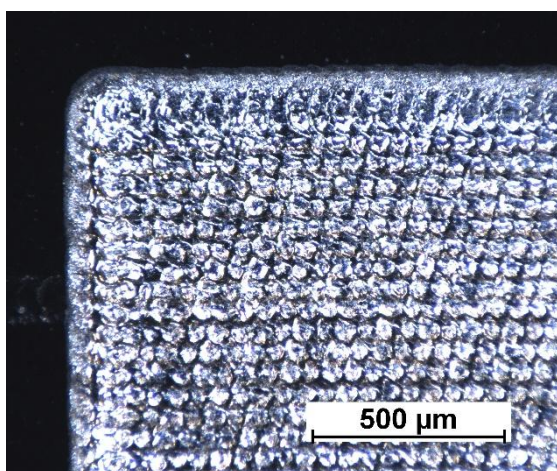
Tab. 9 Laser stripping s několika přejezdy paprsku přes jednu plochu, povlak DLC C



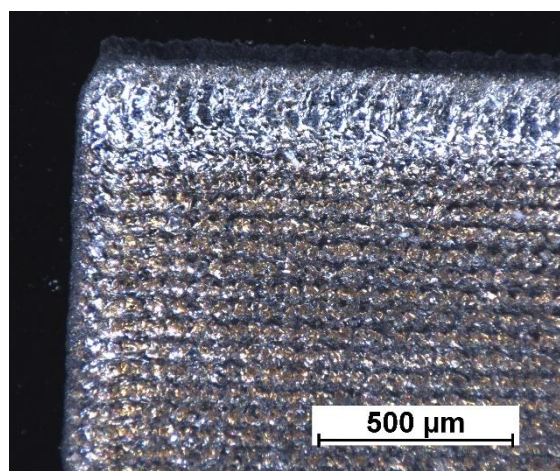
Obr. 60 Graf znázorňující vliv frekvence na pracovní čas při laser strippingu, testy č. C1-C3



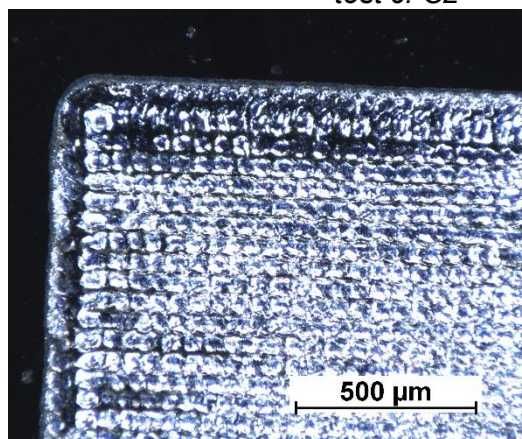
Obr. 61 Graf znázorňující vliv frekvence na plošnou drsnost výsledného povrchu Sa při laser strippingu, testy č. C1-C3



Obr. 62 Mikroskopický snímek povrchu test č. C1

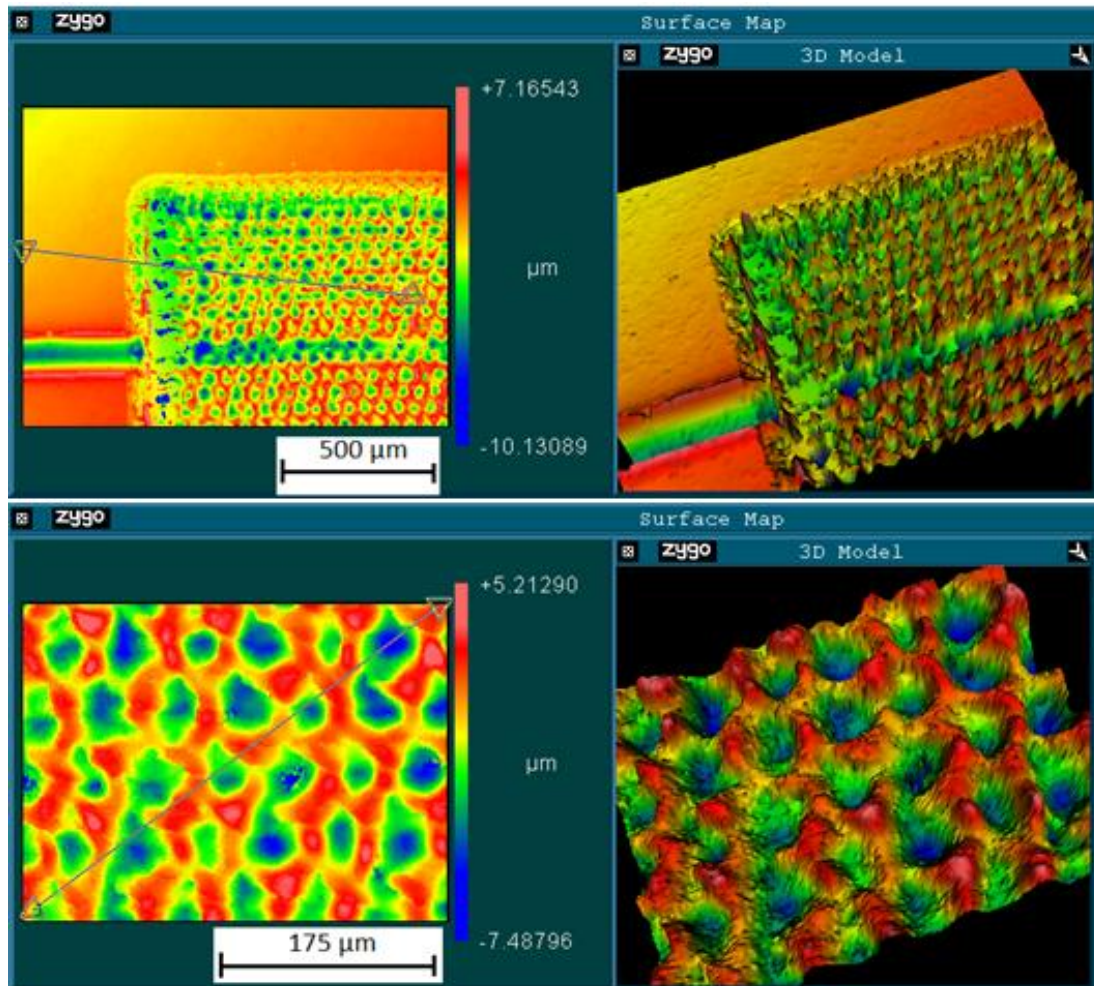


Obr. 63 Mikroskopický snímek povrchu test č. C2

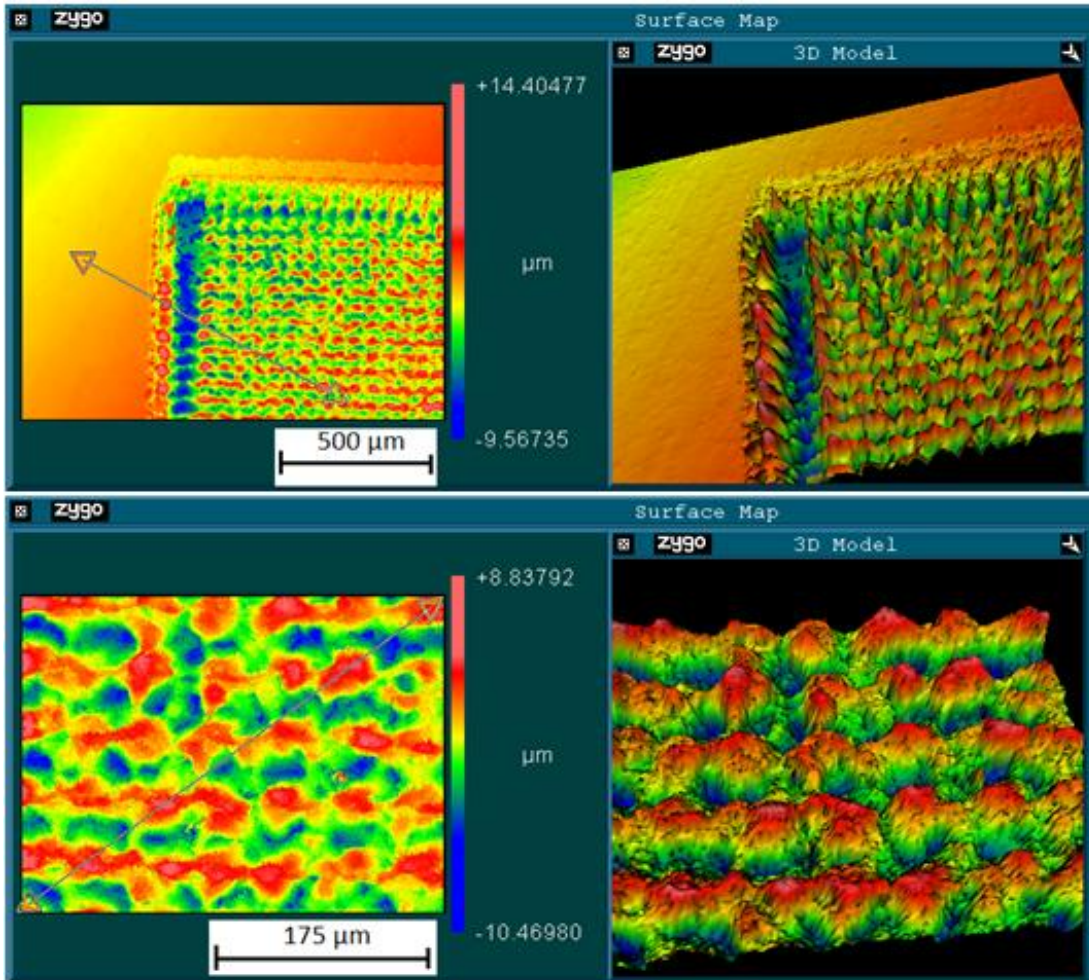


Obr. 64 Mikroskopický snímek povrchu test č. C3

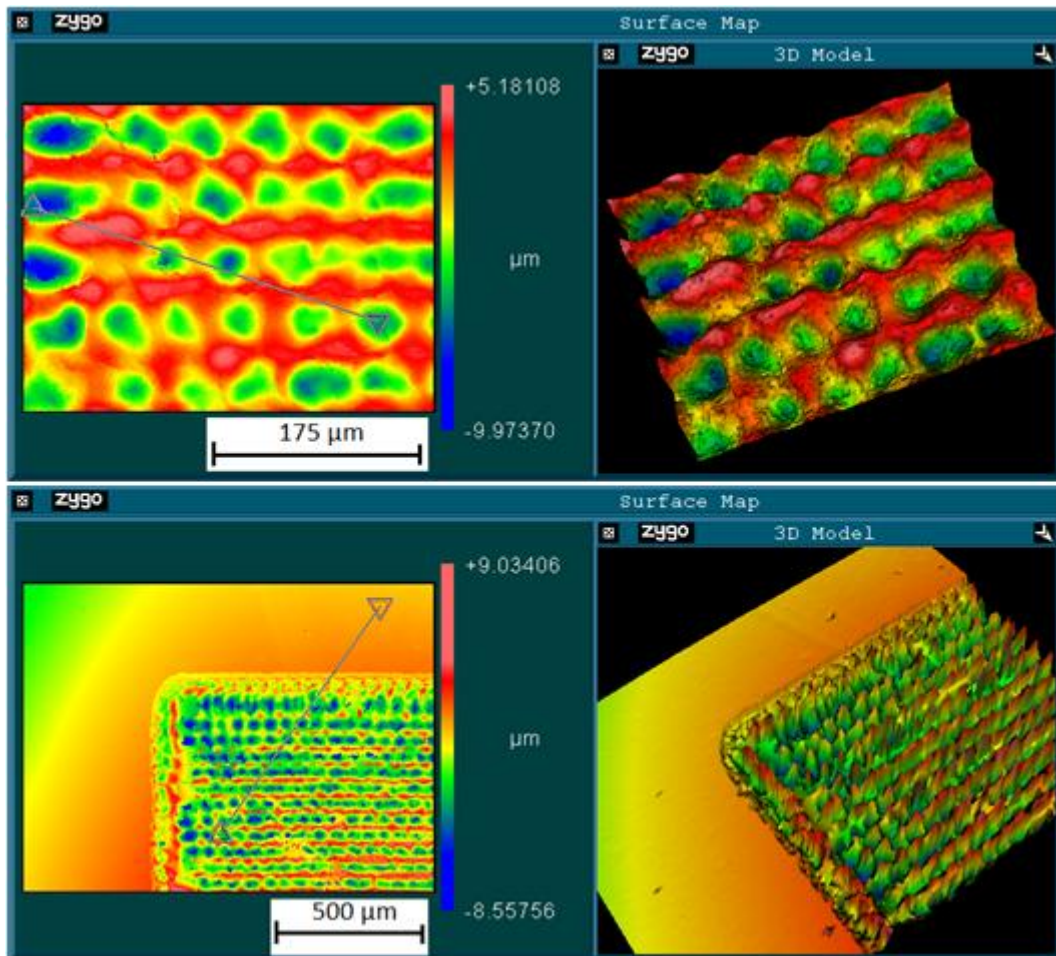
Na fotografiích vzorků z optického mikroskopu jsou vidět odlesky oceli pod povlakem. Povlak je na celé ploše odstraněn. U parametrů C2 zůstává i po vyčištění hnědá barva. Paprsek měl v těchto místech příliš velkou energii a ocel je poničena.



Obr. 65 Snímky z 3D profilometru pro měření hloubky a drsnosti povrchu, test č. C2



Obr. 66 Snímky z 3D profilometru pro měření hloubky a drsnosti povrchu, test č. C2



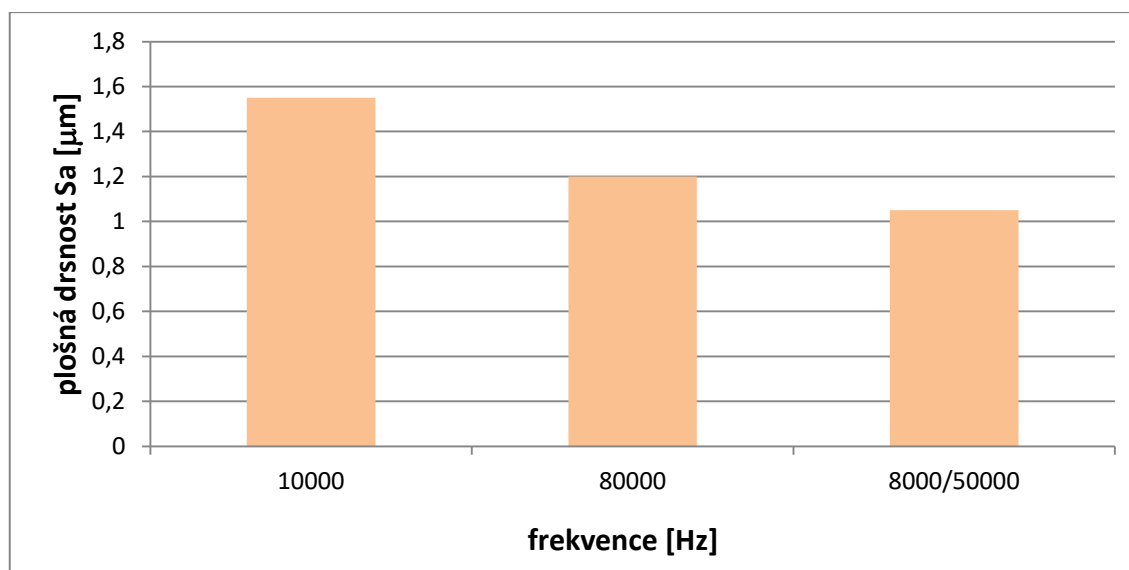
Obr. 67 Snímky z 3D profilometru pro měření hloubky a drsnosti povrchu, test č. C3

Na snímcích z 3D profiloměru je možné pozorovat úspěšně odstraněný povlak. Hloubka působení paprsku je lokálně až 8 mikrometrů. Průměrná hloubka ošetřené plochy oproti původnímu povrchu je i několikanásobně vyšší, než tloušťka povlaku. Tudíž bude nutné snížit dodanou energii. Nejlepšího výsledku plošné drsnosti S_a 1,69 μm a i maximální výšky R_z 6 μm bylo dosaženo parametry test č. C1.

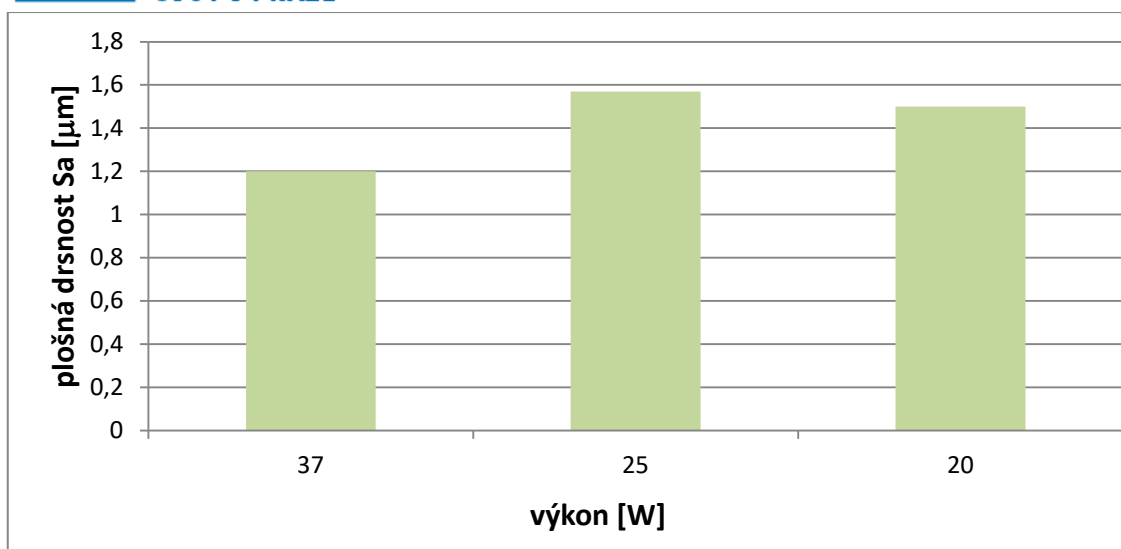
Při následujících experimentech byl vynechán druhý přejezd stripované plochy paprskem a tím sníženo množství energie dodané do povlaku. Pouze v případě č. C6 byl ponechán přejezd s vysokou frekvencí, za účelem vylepšení výsledné drsnosti. V případech č. C7 a C8 byl snížen výkon na 25 W, resp. 20 W s úmyslem snížení energie dodávané na stripovanou plochu a tím zmenšení odstraněné vrstvy.

Test		C4	C5	C6		C7	C8
Zdrojová data	Výkon [W]	37	37	37	37	25	20
	Frekvence [Hz]	10000	8000	8000	50000	8000	8000
	Energie v pulsu [μJ]	3700	4625	4625	740	3125	2500
	Hustota energie [$\text{J}\cdot\text{cm}^{-2}$]	14,54	18,18	18,18	2,91	12,28	9,82
	Rychlost [$\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$]	270	432	270	2700	432	432
	Překryv pulsů [%]	70	70	70	70	70	70
	Překryv pulsů do boku [%]	70	70	70	70	70	70
Naměřená data	Čas na 1 cm^2 [s] software	7,7	5,34	5,34	2,45	5,34	5,34
	Průměrná hloubka odstraněné vrstvy [μm]	3	3,5	4,1		3,3	3,2
	Maximální hloubka odstraněné vrstvy [μm]	6,7	6,1	6,3		8	6,2
	Průměrná aritmetická výška profilu S_a [μm]	1,55	1,2	1,05		1,57	1,5
	Největší výška profilu R_z [μm]	5,7	5,4	4,8		7	8,5

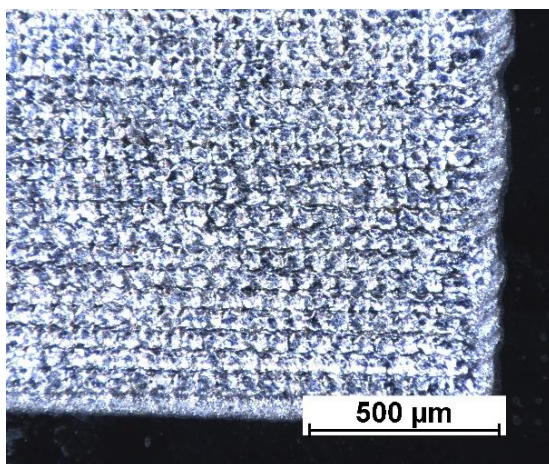
Tab. 10 Laser stripping pro nízkou frekvenci, povlak DIC C



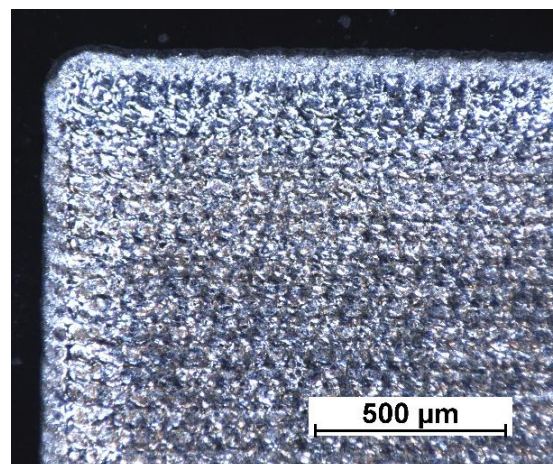
Obr. 68 Graf znázorňující vliv frekvence na plošnou drsnost výsledného povrchu S_a při laser strippingu, testy č. C4-C6



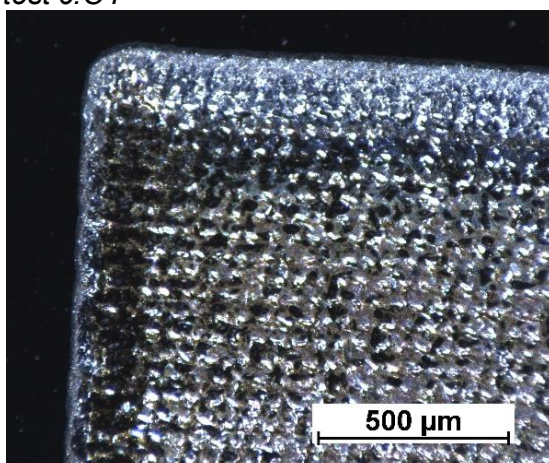
Obr. 69 Graf znázorňující vliv výkonu při stálé frekvenci na plošnou drsnost výsledného povrchu Sa při laser strippingu, testy č. C4, C7, C8



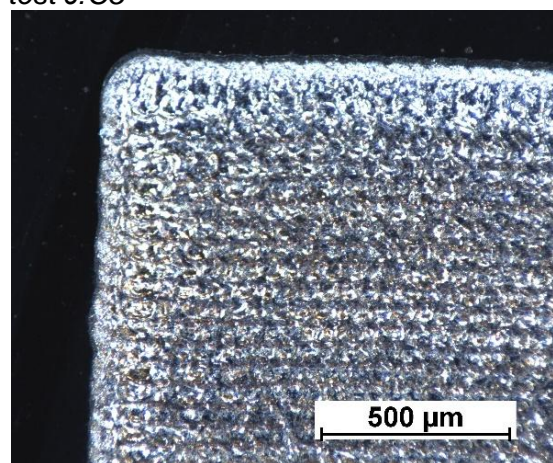
Obr. 70 Mikroskopický snímek povrchu test č. C4



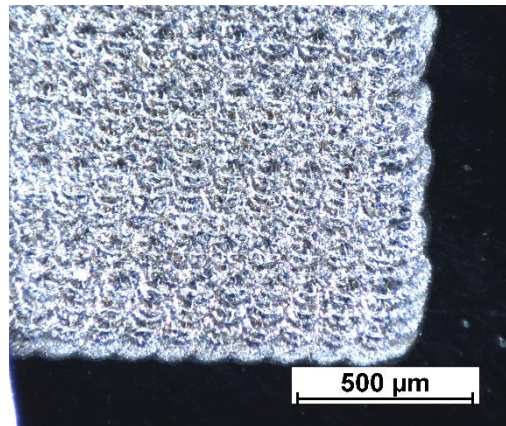
Obr. 71 Mikroskopický snímek povrchu test č. C5



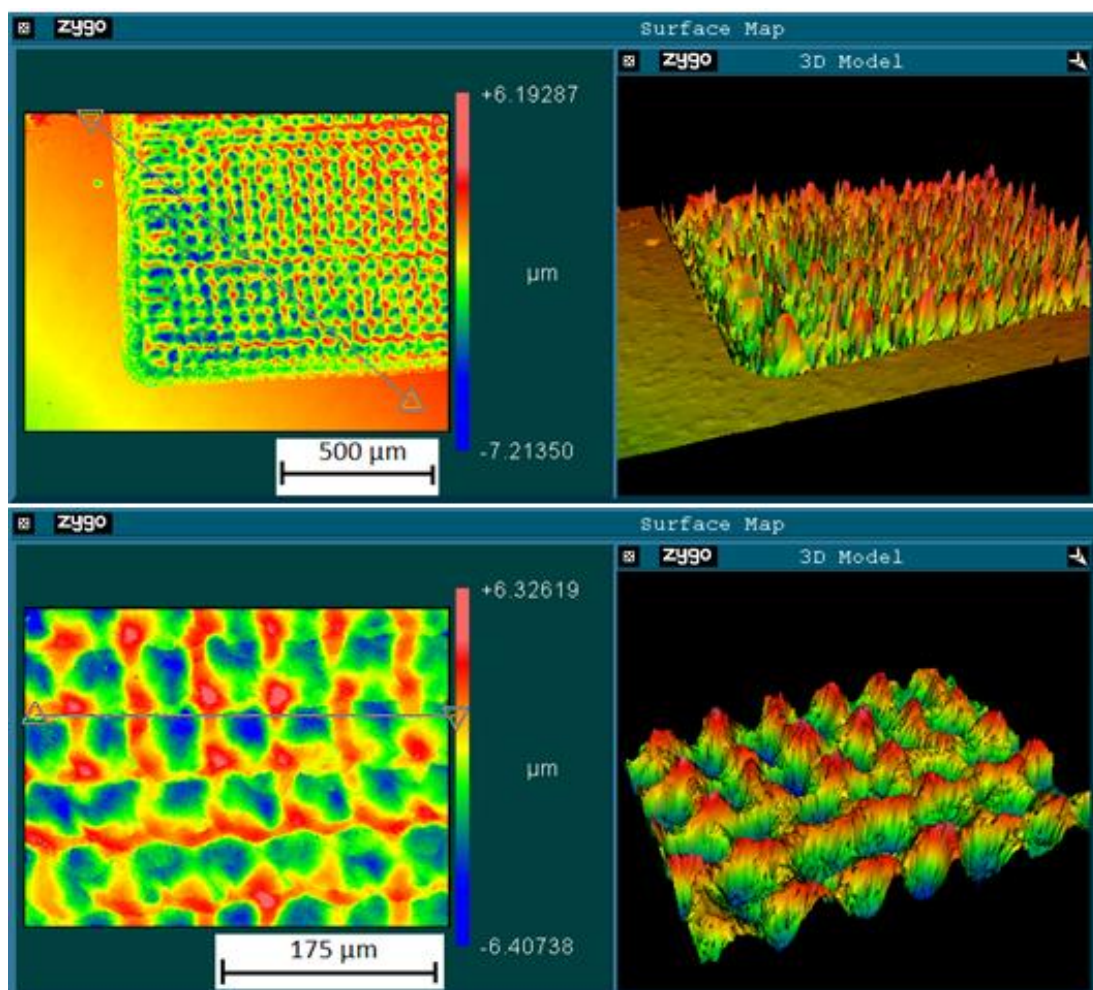
Obr. 72 Mikroskopický snímek povrchu test č. C6



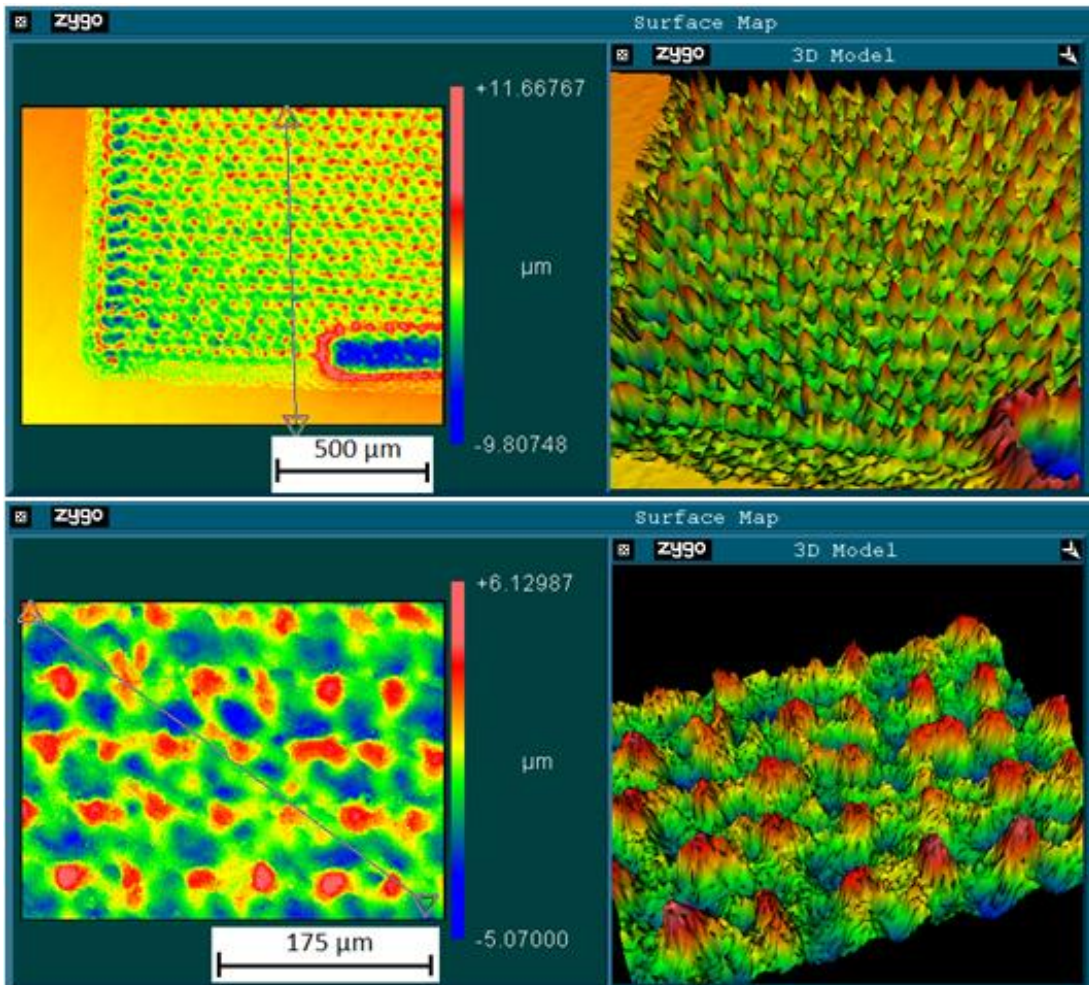
Obr. 73 Mikroskopický snímek povrchu test č. C7



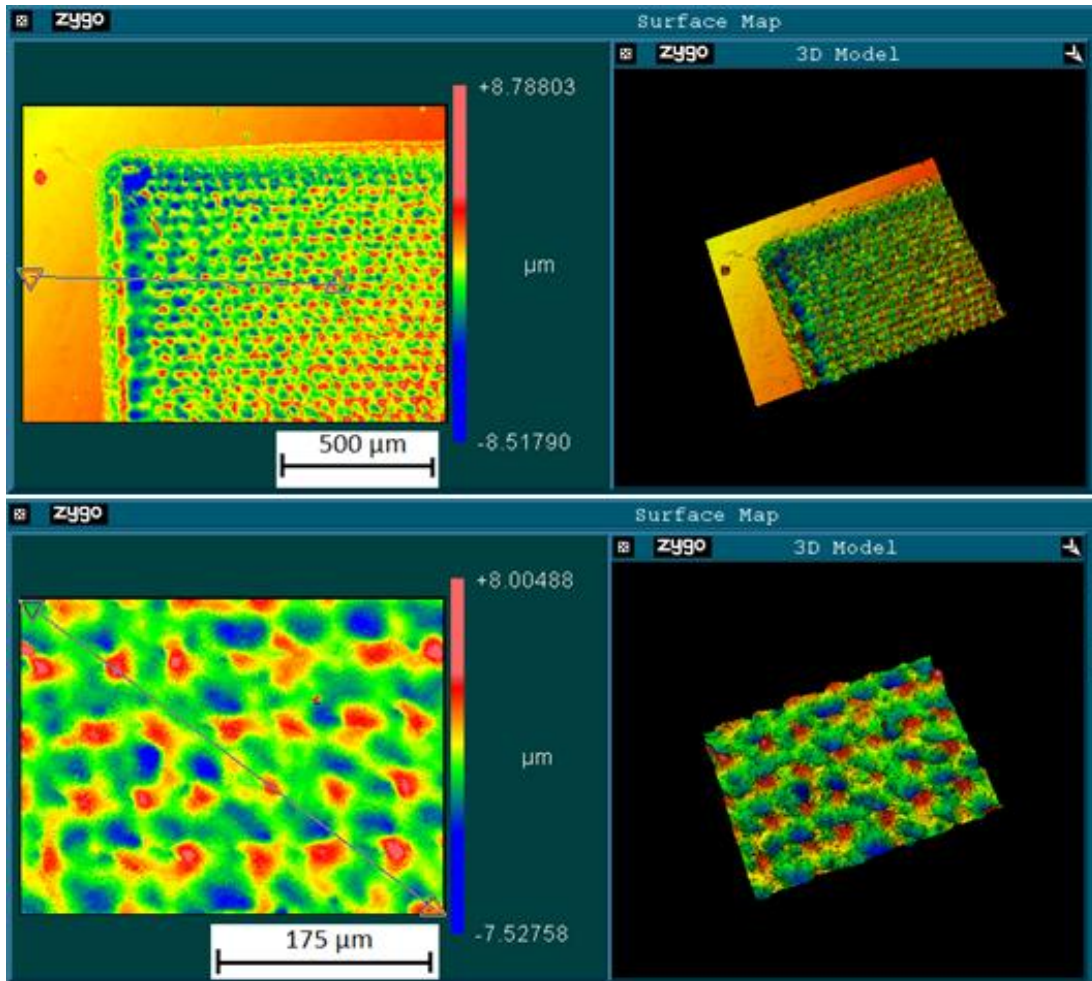
Obr. 74 Mikroskopický snímek povrchu test č.C8



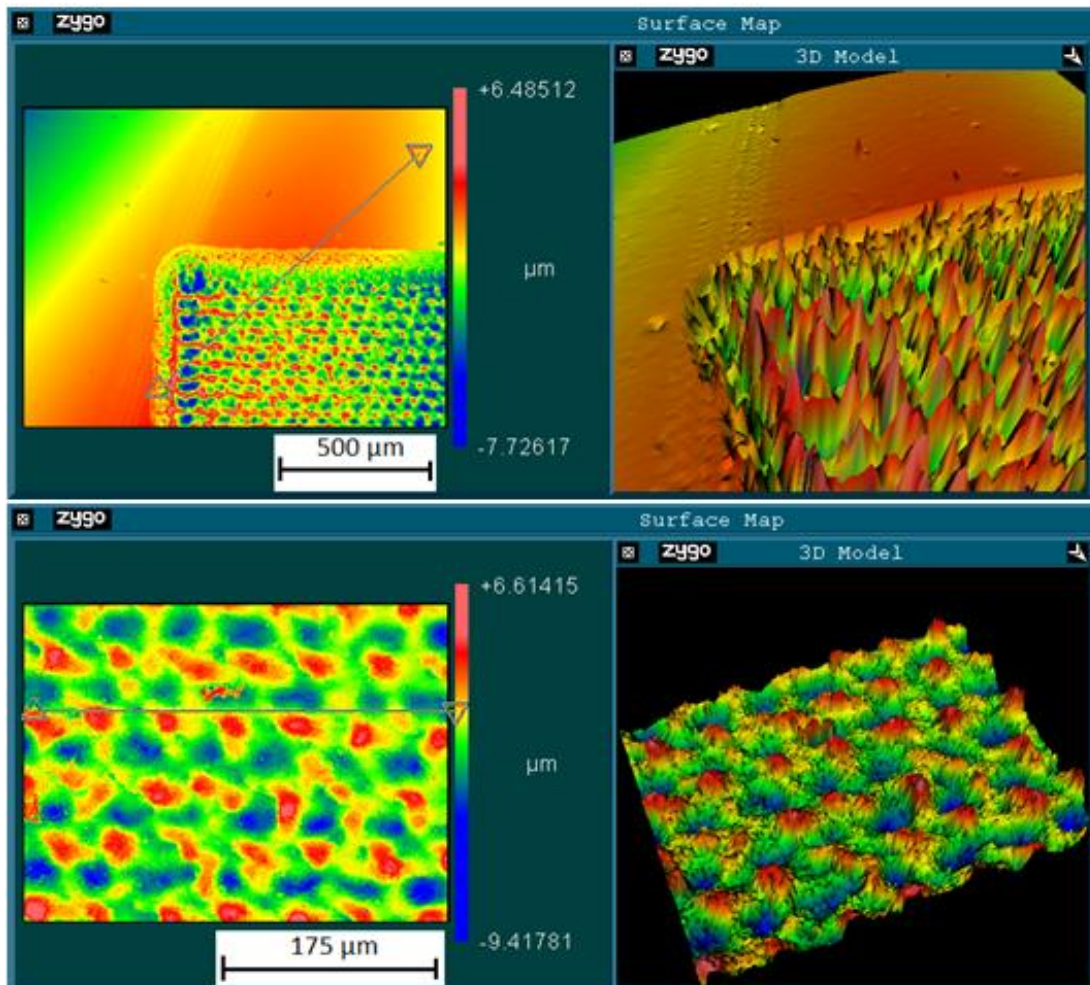
Obr. 75 Snímky z 3D profilometru pro měření hloubky a drsnosti povrchu, test č.C4



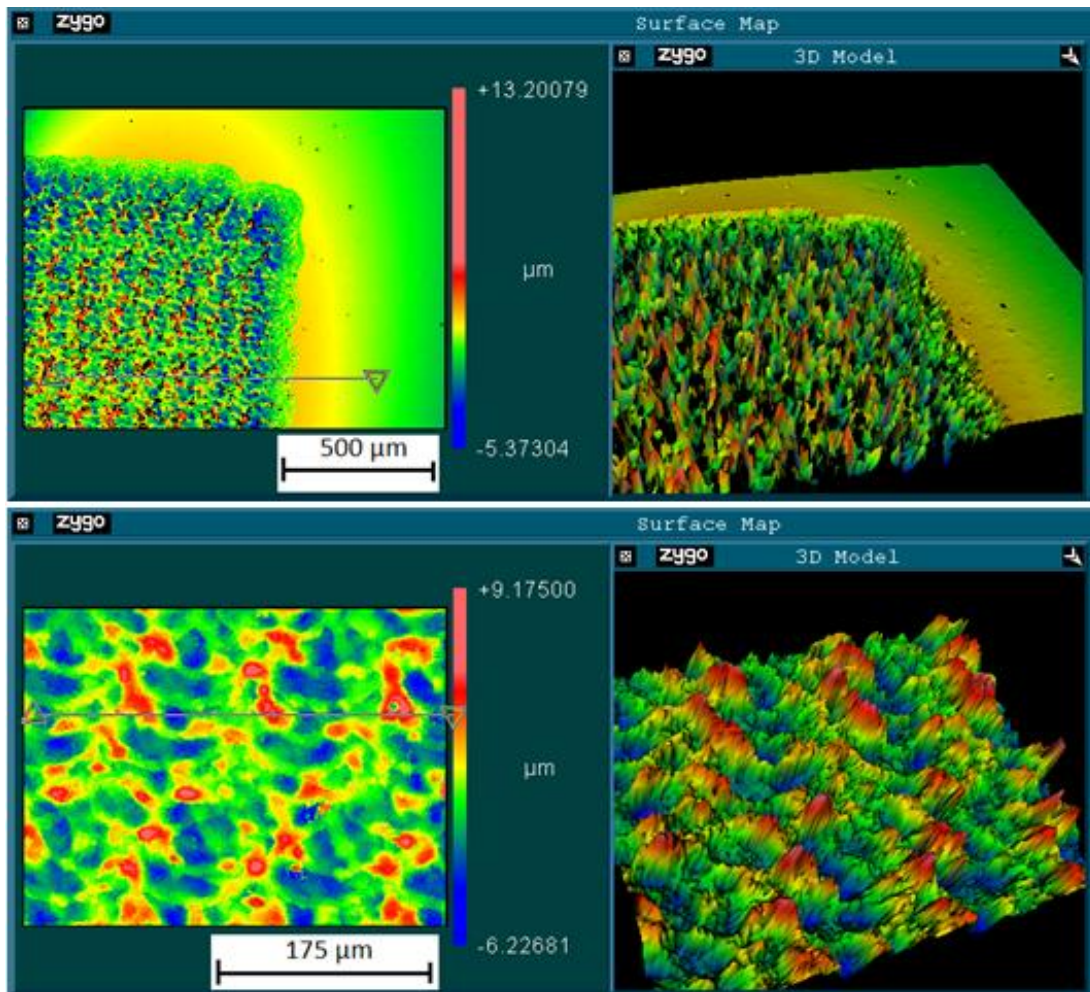
Obr. 76 Snímky z 3D profilometru pro měření hloubky a drsnosti povrchu, test č. C5



Obr. 77 Snímky z 3D profilometru pro měření hloubky a drsnosti povrchu, test č.C6



Obr. 78 Snímky z 3D profilometru pro měření hloubky a drsnosti povrchu, test č. C7



Obr. 79 Snímky z 3D profilometru pro měření hloubky a drsnosti povrchu, test č. C8

Naměřená hloubka (viz Tab. 9) je ve všech případech větší, než je tloušťka povlaku. Povlak byl při experimentu odstraněn. Nicméně pulsy pronikly až o několik mikrometrů hlouběji do základního materiálu. Snahou je poškodit tento materiál co nejméně, proto je tento efekt nežádoucí. Nejpříznivější tloušťka odstraněné vrstvy je pro parametry č. C4, tedy výkonu 37 W a frekvenci 10 kHz. Nejlepší drsnosti bylo dosaženo pomocí parametrů č. C6. Plošná průměrná odchylka $S_a = 1,05 \mu\text{m}$ a maximální odchylka $R_z = 4,8 \mu\text{m}$. Tohoto výsledku bylo dosaženo působením na stejnou plochu pulsy o vysoké frekvenci (50 kHz). Tyto pulsy plochu „rozleštily“. Druhý přejezd ovšem také odebral vrstvu o tloušťce $0,6 \mu\text{m}$. Vysokofrekvenční pulsy odpařují ocel, ale na DLC povlak působí s menším efektem, než pulsy s nízkou frekvencí.

5.3.1 Analýza testů na povlaku DLC C

Na povlaku DLC C bylo provedeno 8 testů. Testy č. C1-C3 skončily nepříznivě, povlak byl odstraněn, ale povrch substrátu byl poškozen. Povlak

DLC C má menší tloušťku a tvrdost než povlak AlTiN, proto byla potřeba snížit výkon. V testech č. C4-C5 byl vynechán druhý přejezd paprsku stripovanou plochou. Nejlepší hodnoty drsnosti $S_a = 1,05 \mu\text{m}$ bylo dosaženo parametry testu č. C6. Nejmenší tloušťky odstraněné vrstvy $3 \mu\text{m}$ bylo dosaženo parametry testu č. C4. Tyto výsledky jsou zobrazeny v Tab. 11. Z důvodu odstranění silnější vrstvy vzorku, než je potřeba, by bylo vhodnější použít parametry pro stripping s nižší fluence – například první přejezd s frekvencí 10 kHz a sníženým výkonem, druhý přejezd s frekvencí 50 kHz pro zlepšení drsnosti povrchu.

		C4 nejpříznivější hloubka odstraněné vrstvy	C6 nejlepší hodnota drsnosti	
Zdrojová data	Výkon [W]	37	37	37
	Frekvence [Hz]	10000	8000	50000
	Energie v pulsu [μJ]	3700	4625	740
	Hustota energie [$\text{J}\cdot\text{cm}^{-2}$]	14,54	18,18	2,91
	Rychlost [$\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$]	270	270	2700
	Překryv pulsů [%]	70	70	70
	Překryv pulsů do boku [%]	70	70	70
Naměřená data	Čas na 1 cm^2 [s] software	7,7	5,34	2,45
	Průměrná hloubka odstraněné vrstvy [μm]	3	4,1	
	Maximální hloubka odstraněné vrstvy [μm]	6,7	6,3	
	Průměrná aritmetická výška profilu S_a [μm]	1,55	1,05	
	Největší výška profilu R_z [μm]	5,7	4,8	

Tab. 12 Nejlepší výsledek testu na DLC C povlaku

6 Závěr

Tato bakalářská práce se zabývá analýzou procesu odstraňování ochranných tvrdých povlaků z řezných nástrojů laserem, tzv. laser stripping. V teoretické části práce jsou popsány ochranné povlaky a jejich způsob depozice. Dále jsou uvedeny a vzájemně porovnány používané metody odstraňování tvrdých povlaků. Tyto metody byly posouzeny zejména s ohledem na jejich vhodnost a ekonomickou výhodnost v závislosti na výsledných vlastnostech (rychlost odstranění, drsnost povrchu, ekologická zátěž pro prostředí). Byly nalezeny čtyři vědecké práce, kdy se jiní autoři zabývali technologií laser stripping. V těchto pracích nebyl proces laser strippingu optimalizován. Z prací také nebylo zřejmé, zda je laser stripping efektivnější než jiné metody odstraňování povlaků.

Experimentální část práce byla věnována dvěma následujícím povlakům: AlTiN povlak o vysoké tvrdosti a DLC C povlak s nízkým koeficientem tření. Povlaky byly odstraňovány na laserovém zařízení LD50s (Ústav výrobních strojů a zařízení, Fakulta strojní, ČVUT v Praze). Stripované plochy byly vyfotografovány na optickém mikroskopu a následně nasnímány na 3D profiloměru Zygo.

Prvním testovaným povlakem byl HPX Booster (AlTiN) o tloušťce 3,2 μm . První sérií experimentů bylo zjištěno, že při ošetření paprskem s vysokou frekvencí je povlak odstraněn minimálně a převážně pouze tepelně ovlivněn. Dalšími testy při frekvenci nižší než 10 kHz byl povlak úspěšně odstraněn. Avšak základní materiál byl částečně nataven a vytlačen pulsy do výstupků, což způsobilo horší kvalitu výsledného povrchu. Nejlepšího výsledku bylo dosaženo pomocí výkonu 37 W, frekvence 8 kHz při překryvu 70 %, a to průměrná plošná výška nerovnosti $S_a = 0,56 \mu\text{m}$ a maximální výška nerovnosti $R_z = 3,2 \mu\text{m}$. doba, za kterou laser odstraní 1 cm^2 povlaku při těchto parametrech je 5,34 sekundy. Nejkratší doba, za kterou byl 1 cm^2 povlaku odstraněn bez ohledu na kvalitu povrchu bylo 5,18 s pro parametry testu č. 6.

Druhým testovaným povlakem byl diamantový povlak „C“ o tloušťce 2,5 μm . První sérií testů bylo zjištěno, že pro odstranění povlaku bude postačující

působit na povlak pulsy s nižším výkonem. Druhý test ukázal, že nejlepší hodnoty plošné drsnosti $S_a = 1,05 \mu\text{m}$ maximální výšky nerovnosti $R_z = 4,8 \mu\text{m}$ bylo dosaženo pomocí rozleštění povrchu po strippingu pomocí vysokofrekvenčních pulsů. Pro všechny testované parametry byl povlak odstraněn, nicméně základní materiál byl poškozen do hloubky cca jednoho mikrometru. Nejpriznivější tloušťku odstraněné vrstvy měl paprsek s výkonem 37 W a frekvencí 10 kHz. Vhodnějšími parametry pro odstranění daného DLC povlaku by měly být dva paprsky, postupně působící na stejnou plochu. Jeden o výkonu 20 W a frekvenci 10 kHz, druhý o výkonu 37 W a frekvencí 50 kHz. Těmito parametry bude doba odstranění 1 cm^2 povlaku DLC C 10,15 sekund. Nejlepší hodnoty drsnosti bylo dosaženo za 7,79 s na 1 cm^2 . Nejkratší doba, za kterou byl 1 cm^2 povlaku DLC C odstraněn bez ohledu na kvalitu povrchu byla 5,34 s.

V této práci byla popsána technologie odstraňování ochranných povlaků. Parametry pro laserové zařízení se liší v závislosti na typu a tloušťce povlaku. Výsledná kvalita povrchu závisí na použitých parametrech a překryvu jednotlivých pulsů. Kvalitu povrchu je možné pomocí laseru zlepšit. Pracovní čas laseru je řádově v sekundách. Odstraňování ochranných povlaků laserem je mnohonásobně rychlejší než běžně používaná chemická metoda odstraňování povlaků.

Seznam použité literatury

- [1] BUCHFINK, Gabriela. *The Laser As a Tool*. Německo: Vogel Buchverlag Wurzburg, 2007, ISBN 978-3834330727.
- [2] HUMÁR, Anton. *Materiály pro řezné nástroje*. . Praha: MM Publishing, 2008. ISBN 9788025422502.
- [3] NĚNIČKA, Jakub. *ODSTRAŇOVÁNÍ PŮVODNÍCH POVLAKŮ ŘEZNÝCH NÁSTROJŮ PŘED NOVÝM POVLAKOVÁNÍM*. Brno, 2008. Diplomová práce. VUT v Brně.
- [4] AUTOR NEUVEDEN. *Decoating (Stripping)* [online]. , 1-8 [cit. 2018-11-21]. Dostupné z: <https://www.platit.com/>
- [5] CRISTÓBAL, A.B., A. CONDE, J. HOUSDEN a KOLEKTIV AUTORŮ. *Electrochemical stripping of hard ceramic chromium nitride coatings* [online]. 2005, , 1-6 [cit. 2018-11-21]. Dostupné z: www.sciencedirect.com
- [6] REMNEV, Alexey, Yasuhiro KOIZUMI a Akira OKADA. *Ion Beam Etching Process for Cutting Tools Decoating* [online]. 2016, , 1-2 [cit. 2018-11-21]. Dostupné z: www.jstage.jst.go.jp
- [7] MARIMUTHU, S., A.M KAMARA, D. WHITEHEAD, P. MATIVENGA a L. LI. *Laser removal of TiN coatings from WC micro-tools and in-process monitoring* [online]. 2010, , 1-6 [cit. 2019-01-03]. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2010.03.016>. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0030399210000848>
- [8] MARIMUTHU, S., D. WHITEHEAD, P. MATIVENGA, L. LI a K.E. COOKE. *Excimer laser decoating of chromium titanium aluminium nitride to facilitate re-use of cutting tools* [online]. 2009, , 1-7 [cit. 2019-01-03]. DOI: 10.1016/j.optlastec.2009.04.003. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/229371674_Excimer_laser_decoating_of_chromium_titanium_aluminium_nitride_to_facilitate_re-use_of_cutting_tools

- [9] T. LONG SEE, T. LI, D. CHANTZIS, R. MARIMUTHU, I. METSIOS a M. ANTAR. *Ultraviolet-Diode Pump Solid State Laser Removal of Titanium Aluminium Nitride Coating from Tungsten Carbide Substrate* [online]. 2017, , 1-12 [cit. 2019-01-03]. DOI: 10.1016/j.optlastec.2009.04.003. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/318432297_Ultraviolet-Diode_Pump_Solid_State_Laser_Removal_of_Titanium_Aluminium_Nitride_Coating_from_Tungsten_Carbide_Substrate[9]
- [10] RAZAB, Mohammad Khairul a KOLEKTIV. *A review of incorporating Nd:YAG laser cleaning principal in automotive industry* [online]. 2018, , 1-10 [cit. 2019-01-05]. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jrras.2018.08.002>. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S168785071830089X?via%3Dihub#!>
- [11] AUTOR NEUVEDEN. *Systémy pro laserové čištění* [online]. 2018, , 1 [cit. 2019-01-05]. Dostupné z: <https://www.lascam.cz/produkty/systemy-pro-laserove-cistení/>
- [12] NOVÁK, Miroslav. *Průmyslové lasery (1) – princip laseru* [online]. 2012, , 1 [cit. 2019-01-05]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/prumyslove-lasery-1-princip-laseru.html>
- [13] ŠMÍD, Jiří. *Lasery pro průmysl* [online]. 2008, , 1 [cit. 2019-01-05]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/lasery-pro-prumysl.html>
- [14] KOŘÁN, Pavel. *Průmyslové lasery (5) - Laserové řezání* [online]. 2012, , 1 [cit. 2019-01-05]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/prumyslove-lasery-5-laserove-rezani.htm>
- [15] PETRUS, Jakub. *Vliv technologických parametrů řezání vláknovým laserem na kvalitu řezu*. Praha, 2018. Bakalářská práce. ČVUT v Praze. Vedoucí práce Ing. Jan Brajer
- [16] BRAJER, Jan. *Laserové navařování kovových materiálů*. Praha, 2012. Diplomová práce. ČVUT v Praze. Vedoucí práce Doc. Ing. Jiří Cejp, CSc.

- [17] ZIVELONGHI, A., L. GIORLEO, M. GELFI, E. CERETTI a G.M. LA VECCHIA. *Laser decoating of DLC films for tribological applications* [online]. 2017, , 1-12 [cit. 2019-01-05]. DOI: 10.1007/s00170-017-0482-z. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/318168691_Laser_decoating_of_DLC_films_for_tribological_applications
- [18] SEE, T.L., I. METSIOS, D. QUIAN, M. ANTAR a S. MARIMUTHU. *Feasibility study and demonstration of cleaning with laser adaptively by novel use of sensors* [online]. , 1-7 [cit. 2018-12-06]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212827118309326>
- [19] SEE, T.L., I. METSIOS, R. ROYER, M. ANTAR, S. MARIMUTHU a D. CHANTZIS. *A comparison of the DPSS UV laser ablation characteristic of 1024 and H10F WC-Co* [online]. , 1-8 [cit. 2018-12-06]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/>
- [20] BREIDENSTEIN, B., B. DENKENA, B. BERGMANN a A. KROEDEL. *Laser material removal on cutting tools from different materials and its effect on wear behavior* [online]. 2016, , 1-6 [cit. 2018-12-13]. Dostupné z: <https://www.researchgate.net/>
- [21] Menini, Richard & Ben Salah, Nihad & Nciri, Rachid. (2004). *Stripping methods studies for HVOF WC-10Co-4Cr coating removal*. Journal of Materials Engineering and Performance. 13. 185-194. 10.1361/10599490418460.
- [22] SCHUBERT, Emil, K. SCHUTTE, A. EMMEL a H.W. BERGMANN. *Excimer laser assisted TiN and WC removal from tools as a novel decoating technology* [online]. 1995, , 1-9 [cit. 2018-12-06]. DOI: 10.1117/12.204987. Dostupné z: [linkspringer.com](https://www.linkspringer.com)
- [23] AKPINAR, Yusuf, Abdullah KEPCOGLU, Tevfik YAVUZ a KOLEKTIV. *Effect of femtosecond laser beam angle on bond strength of zirconia-resin cement* [online]. 2014, , 1-6 [cit. 2018-12-20]. DOI: 10.1007/s10103-015-1762-1. Dostupné z: <https://www.researchgate.net>
- [24] HUMÁR, Anton. *Materiály pro řezné nástroje: Interaktivní multimediální text*. In: VUT v Brně, FSI-Ústav strojírenské technologie: Odbor technologie

obrábění [online]. 2006 [cit. 2018-11-22]. Dostupné z:

http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/mat_pro_rez_nastroje/materialy_pro_rezne_nastroje_v2.pdf

[25] HAUPT, Oliver, Dirk MULLER a Frank GABLER. *The effect of pulse width on machining with nanosecond lasers*. In: Photonics Media [online]. [cit. 2019-01-5]. Dostupné z:

https://www.photonics.com/Articles/Shorter_Pulse_Widths_Improve_Micromachining/a54123

[26] HAUPT, Oliver, Dirk MULLER a Frank GABLER. *Nanosecond lasers drill or cut by heating and boiling off material*. In: Photonics Media [online]. [cit. 2019-01-5]. Dostupné z:

https://www.photonics.com/Articles/Shorter_Pulse_Widths_Improve_Micromachining/a54123

[27] DANĚK, Martin. Osobní sdělení (Katedra řídicí techniky, Fakulta elektrotechnická, ČVUT v Praze) dne 8. 4. 2019.

[28] ČERMÁK, Adam. *LASER v procesech mikroobrábění a monolitních řezných nástrojů*. Plzeň, 2017. Disertační práce. Západočeská Univerzita v Plzni. Vedoucí práce Ing. Pavel Kožmín, Ph.D.

[29] Povlakování dílů. *AdvaMat* [online]. Jihlava, 2018 [cit. 2019-07-15]. Dostupné z: <https://www.advamat.cz/povlakovani-dilu/>

Seznam obrázků

Obr. 1 Schéma principu laseru [12].....	13
Obr. 2 Bezpečnostní symbol používaný pro lasery třídy II a vyšší [16]	17
Obr. 3 Dostupné materiály pro řezné nástroje [24].....	18
Obr. 4 Schéma abrazivního tryskání [3]	23
Obr. 5 Schéma elektrochemického odstraňování povlaků [3].....	25
Obr. 6 Schéma odstraňování povlaků iontovým paprskem A) vakuová komora, B) zdroj iontového paprsku, C) přívod plynu, D) odpovlakovaný nástroj, E) iontový paprsek, F) uzemnění, G) vývod vakuové pumpy [3]	26
Obr. 7 Závislost absorpce paprsku materiálem na vlnové délce daného paprsku[14]..	28
Obr. 8 Princip laserové ablace A) kovový substrát, B) vrstvy povlaku, C) laserový paprsek, D) plasma, E)tlaková rázová vlna a síť prasklin, F) povlak je odstraněn [10].	28
Obr. 9 Princip termálního rozkladu A) kovový substrát, B) vrstvy povlaku, C) laserový paprsek, H) plamen a spaliny [10].....	29
Obr. 10 Překrytí pulsů ve dvou osách [28].....	31
Obr. 11 Gaussovský typ paprsku. Závislost výkonu na čase při dlouhém pulsu (vlevo) a krátkém pulsu (vpravo): A) Použitelná energie jednoho pulsu, B) zmařená energie, C) výkon potřebný k překonání ablačního prahu [25].....	33
Obr. 12 Textura povrchu při různých rychlostech strippingu a překrývání jednotlivých bodů [8]	33
Obr. 13 Procentuální rozložení prvků v povrchu, ze kterého byl laserem odstraněn povlak, v závislosti na výkonu a počtu pulsů. A) počet pulsů 285,6 B) fluence 3,38 J·cm ⁻² [9].....	Chyba! Záložka není definována.
Obr. 14 Povrchová morfologie po laser strippingu A) původní, referenční povrch B) 285,6 pulsů a 3,38 J·cm ⁻² ; C) 285,6 pulsů a 5,41 J·cm ⁻² ; D) 285,6 pulsů a 7,44 J·cm ⁻² ; E) 61,6 pulsů a 3,38 J·cm ⁻² ; F) 509,6 pulsů a 3,38 J·cm ⁻² [9].....	35
Obr. 15 Ablace materiálu v závislosti na počtu pulsů a fluence [18].....	36
Obr. 16 Příklad vlivu rychlosti paprsku na hloubku ovlivněného materiálu [7].....	37
Obr. 17 Tepelně ovlivněná zóna při delších pulsech (vlevo) a ideální, teoretická zóna (vpravo). A) teplem ovlivněná zóna, B) mikrotrhliny, C) vystřelený roztavený materiál, D) přetavená vrstva, E) úlomky materiálu na povrchu, F) mlžný výpar [26]	38
Obr. 18 Vliv naklonění paprsku na hloubku odstraněné vrstvy. A – úhel 90°, b – úhel 75°, c- úhel 60°, d – úhel 45° [23].....	39
Obr. 19 Laserové zařízení LD50s Tab. 3 Jmenovité parametry laseru	42
Obr. 20 fotografie původního povrchu povlaku HPX Booster.....	43
Obr. 21 fotografie původního povrchu povlaku DLC C.....	43
Obr. 22 Graf znázorňující vliv frekvence na pracovní čas při laser strippingu, testy č. 1-6	45
Obr. 23 Mikroskopický snímek povrchu test č. 1	45
Obr. 24 Mikroskopický snímek povrchu test č. 2.....	45
Obr. 25 Mikroskopický snímek povrchu test č. 3.....	46
Obr. 26 Mikroskopický snímek povrchu test č. 4.....	46
Obr. 27 Mikroskopický snímek povrchu test č. 5.....	46
Obr. 28 Mikroskopický snímek povrchu test č. 6.....	46



Obr. 29 Snímek z 3D profiloměru povrchu test č. 1	47
Obr. 30 Snímek z 3D profiloměru povrchu test č. 2	47
Obr. 31 Snímek z 3D profiloměru povrchu test č. 3	48
Obr. 32 Snímek z 3D profiloměru povrchu test č. 4	48
Obr. 33 Snímek z 3D profiloměru povrchu test č. 5	48
Obr. 34 Snímek z 3D profiloměru povrchu test č. 6	49
Obr. 35 Graf znázorňující vliv frekvence na pracovní čas při laser strippingu, testy č. 7-11	50
Obr. 36 Graf znázorňující vliv frekvence na plošnou drsnost výsledného povrchu Sa při laser strippingu, testy č. 7-11	50
Obr. 37 Mikroskopický snímek povrchu test č. 7	51
Obr. 38 Mikroskopický snímek povrchu test č. 8	51
Obr. 39 Mikroskopický snímek povrchu test č. 9	51
Obr. 40 Mikroskopický snímek povrchu test č. 10	51
Obr. 41 Mikroskopický snímek povrchu test č. 11	51
Obr. 42 – Snímky z 3D profilometru pro měření hloubky a drsnosti povrchu, test č. 7 ..	52
Obr. 43 - Snímky z 3D profilometru pro měření hloubky a drsnosti povrchu, test č. 8 ..	53
Obr. 44 - Snímky z 3D profilometru pro měření hloubky a drsnosti povrchu, test č. 9 ..	54
Obr. 45 Snímky z 3D profilometru pro měření hloubky a drsnosti povrchu, test č. 10 ..	55
Obr. 46 Snímky z 3D profilometru pro měření hloubky a drsnosti povrchu, test č. 11 ..	56
Obr. 47 Graf znázorňující vliv frekvence na pracovní čas při laser strippingu, testy č. C1-C3	58
Obr. 48 Graf znázorňující vliv frekvence na plošnou drsnost výsledného povrchu Sa při laser strippingu, testy č. C1-C3	59
Obr. 49 Mikroskopický snímek povrchu test č. C1	59
Obr. 50 Mikroskopický snímek povrchu test č. C2	59
Obr. 51 Mikroskopický snímek povrchu test č. C3	59
Obr. 52 Snímky z 3D profilometru pro měření hloubky a drsnosti povrchu, test č. C2 .	60
Obr. 53 Snímky z 3D profilometru pro měření hloubky a drsnosti povrchu, test č. C2	61
Obr. 54 Snímky z 3D profilometru pro měření hloubky a drsnosti povrchu, test č. C3	62
Obr. 55 Graf znázorňující vliv frekvence na plošnou drsnost výsledného povrchu Sa při laser strippingu, testy č. C4-C6	63
Obr. 56 Graf znázorňující vliv výkonu při stálé frekvenci na plošnou drsnost výsledného povrchu Sa při laser strippingu, testy č. C4, C7, C8	64
Obr. 57 Mikroskopický snímek povrchu test č. C4	64
Obr. 58 Mikroskopický snímek povrchu test č. C5	64
Obr. 59 Mikroskopický snímek povrchu test č. C6	64
Obr. 60 Mikroskopický snímek povrchu test č. C7	64
Obr. 61 Mikroskopický snímek povrchu test č. C8	65
Obr. 62 Snímky z 3D profilometru pro měření hloubky a drsnosti povrchu, test č. C4 ..	65
Obr. 63 Snímky z 3D profilometru pro měření hloubky a drsnosti povrchu, test č. C5 ..	66
Obr. 64 Snímky z 3D profilometru pro měření hloubky a drsnosti povrchu, test č. C6 ..	67
Obr. 65 Snímky z 3D profilometru pro měření hloubky a drsnosti povrchu, test č. C7 ..	68
Obr. 66 Snímky z 3D profilometru pro měření hloubky a drsnosti povrchu, test č. C8 ..	69

Seznam tabulek

<i>Tab. 1 Bezpečnostní třídy laseru [16]</i>	17
<i>Tab. 2 Publikované způsoby laser strippingu.</i>	30
<i>Tab. 3 Porovnání metod odstraňování povlaků [27]</i>	40
<i>Obr. 19 Laserové zařízení LD50s Tab. 4 Jmenovité parametry laseru</i>	42
<i>Tab. 5 Laser stripping, spolupracující firma vs. vlastní nastavení</i>	44
<i>Tab. 6 Laser stripping pro maximální produktivitu, povlak HPX Booster</i>	45
<i>Tab. 7 Laser stripping pro nízkou frekvenci, povlak HPX Booster</i>	50
<i>Tab. 8 Optimální parametry pro laser stripping AlTiN povlaku</i>	57
<i>Tab. 9 Laser stripping s několika přejezdy paprsku přes jednu plochu, povlak DLC C</i>	58
<i>Tab. 10 Laser stripping pro nízkou frekvenci, povlak DIC C</i>	63
<i>Tab. 12 Nejlepší výsledek testu na DLC C povlaku</i>	70

Seznam elektronických příloh

Příloha č.1:	bp_hlavinka_laserstripping_2019.pdf
Příloha č.2:	zdroj_3.pdf
Příloha č.3:	zdroj_4.pdf
Příloha č.4:	zdroj_5.pdf
Příloha č.5:	zdroj_6.pdf
Příloha č.6:	zdroj_7.pdf
Příloha č.7:	zdroj_8.pdf
Příloha č.8:	zdroj_9.pdf
Příloha č.10:	zdroj_10.pdf
Příloha č.11:	zdroj_15.pdf
Příloha č.12:	zdroj_16.pdf
Příloha č.13:	zdroj_17.pdf
Příloha č.14:	zdroj_18.pdf
Příloha č.15:	zdroj_19.pdf
Příloha č.16:	zdroj_20.pdf
Příloha č.17:	zdroj_21.pdf
Příloha č.18:	zdroj_22.pdf
Příloha č.19:	zdroj_23.pdf
Příloha č.20:	zdroj_24.pdf
Příloha č.21:	zdroj_28.pdf