

UNIVERZITA PALACKÉHO V OLMOUCI
PŘÍRODOVĚDECKÁ FAKULTA
KATEDRA EXPERIMENTÁLNÍ FYZIKY

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Laserové navařování kovovým práškem



Vypracoval:	Martin Učík
Studijní program:	B1701 Fyzika
Studijní obor:	Aplikovaná fyzika
Forma studia:	Prezenční
Vedoucí diplomové práce:	RNDr. Hana Chmeličková
Termín odevzdání práce:	srpen 2018

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou diplomovou práci vypracoval samostatně pod vedením RNDr. Hany Chmelíčkové a že jsem použil zdrojů, které cituji a uvádím v seznamu použitých pramenů.

V Olomouci dne 27. srpna 2018

.....
Martin Učík

Poděkování

Rád bych poděkoval všem, kteří mi pomohli s realizací této práce. Především vedoucí práce RNDr. Haně Chmelíčkové za vstřícnost a odbornou pomoc, ale i pomoc s přípravou a analýzou vzorků. Také firmě MATEX PM s.r.o. za poskytnutí vzorků laserových návarů, zejména Ing. Františku Wágnerovi. Dále pracovníkům Společné laboratoře optiky UP a Fyzikálního ústavu AV ČR v Olomouci RNDr. Heleně Hiklové, Mgr. Janu Tomáščíkovi a Bc. Lukáši Václavkovi za pomoc s měřením.

Bibliografická identifikace

Jméno a příjmení autora	Martin Učík
Název práce	Laserové navařování kovovým práškem
Typ práce	Bakalářská
Pracoviště	Katedra experimentální fyziky
Vedoucí práce	RNDr. Hana Chmeličková
Rok obhajoby práce	2018
Abstrakt	Tato práce se v první části věnuje laserovému přetavování povrchu a jeho vlastnostem při změně vzdálenosti ohniskové roviny od roviny dopadu. Ve druhé části pracuje s navařováním kovového prášku na substrát. Zkoumá, zda má vliv předeřtání substrátu na vlastnosti návaru jako jsou tvrdost a pórovitost.
Klíčová slova	Přetavování povrchu, laserové navařování kovovým práškem.
Počet stran	35
Jazyk	český

Bibliographical identification

Autor's first name and surname	Martin Učík
Title	Laser Cladding
Type of thesis	Bachelor
Department	Department of Experimental Physics
Supervisor	RNDr. Hana Chmeličková
The year of presentation	2018
Abstract	The first part of this thesis is focused on the laser surface remelting and its properties when changing the distance between the focal plane and the plane of incidence. In the second part the thesis works with laser cladding with metal powder coating on the substrate. It examines whether the substrate preheating has an influence on the properties of welded powder such as hardness and porosity.
Keywords	Surface remelting, laser cladding.
Number of pages	35
Language	czech

Obsah

Úvod	7
1 Laserové navařování kovového prášku	9
2 Použité přístroje a metody	12
2.1 Kontaktní profilometr	12
2.2 Konfokální mikroskop	12
2.3 Zkouška tvrdosti podle Vickerse	13
2.3.1 Hanemannův mikrotvrdoměr	14
3 Vlastnosti přetaveného povrchu v závislosti na parametrech laserového svazku	15
3.1 Nd:YAG laser a materiál	15
3.2 Experiment	16
3.2.1 Měření šířek přetavených stop	17
3.2.2 Měření hloubek přetavených stop	18
3.2.3 Měření profilu povrchu přetavených stop	20
3.3 Vyhodnocení	23
4 Vlastnosti navařených vrstev v závislosti na předehřevu substrátu	24
4.1 Diodový laser, ocelový substrát a kovové prášky	24
4.2 Experiment	25
4.2.1 Měření prasklin a pórů	26
4.2.2 Měření tvrdosti podle Vickerse	28
4.2.3 Mikrostruktura	30
4.3 Vyhodnocení	32
Závěr	33
Literatura	34

Úvod

Povrchové vlastnosti materiálu je často nutné modifikovat, tj. zlepšit je pro konkrétní využití dané součásti. Jednou z metod je nanesení povlaku či vrstvy. Např. pozinkováním ocele lze zvýšit její korozní odolnost, nebo namísto této tenké vrstvy, která přejímá některé vlastnosti substrátu, lze na ocel navařit vrstvu kovového prášku, který kromě odolnosti vůči korozi zvyšuje dále otěruvzdornost. Návar má tak větší tvrdost, ale za cenu vyšší křehkosti. Taková vrstva se označuje jako tlustá, jelikož se chová stejně na různých substrátech.

Pro vrstvu je důležitým kritériem přilnavost, což úzce souvisí s pnutím uvnitř vrstvy v návaznosti na chování během teplotních cyklů, během nichž mohou být krajní pracovní teploty limitovány vlastnostmi vrstvy. Např. při použití kovové martenzitické vrstvy by se neměla překročit jistá teplota, jinak by došlo k fázové změně a struktura kovu by se změnila natolik, až by došlo k výraznému zhoršení původních schopností.

Vrstvy a povlaky lze rozdělit podle technologické výroby: do chemických metod se řadí kupříkladu spolehlivá a účinná metoda galvanizace, při níž dochází v pokovování kovem z anody tak, že při napětí mezi elektrodami v nádobě obsahující elektrolyt s kationty kovu dochází k jejich přesunu na katodu, která představuje součást určenou k pokovování. Nevýhody spočívají v rozdílném růstu v závislosti na tvaru povrchu katody a přestože se tímto způsobem připravují velmi čisté kovy (elektrovodivá měď), tak dochází ke kontaminaci vrstvy vodíkem v podobě vodíkového kationtu.

Difúzním způsobem se připravují nitridové vrstvy, které zvyšují tvrdost substrátu. Lze jí dosáhnout buď zapálením doutnavého výboje stejnosměrným napětím, který ionizuje plyn dusíku ve vakuové komoře. Vzniklé ionty vysokou rychlostí pronikají pod povrch anody, která představuje nitridovanou součást. Druhým procesem je klasická nitridace, kdy je součást v atmosféře NH_3 a za zvýšené teploty pronikají atomy dusíku snáze pod povrch.

Magnetronovým napařováním se získávají především tenké vrstvy. Tato metoda umožňuje nanášet i prvky s vysokou teplotou varu, jelikož ta již není podstatná. V principu totiž pracuje ve vysokém vakuu, v němž magnetron vytváří velmi silné magnetické pole, které ionizuje inertní plyn. Ten dopadá na terčík s nanášeným kovem a rozprašuje jej do prostoru. Je zřejmé, že metodu lze použít pouze na nejlépe rovné plochy, které se vystaví kolmo na směr atomů kovu z terčíku. Tímto způsobem připravené vrstvy jsou velmi čisté (vyjma atomy inertního plynu) a homogenní.

Kovové návary spadají do tlustých vrstev. Zdrojem materiálu může být buď kovový drát, nebo prášek. Drát lze navařovat elektrodou, což se vyznačuje značným promísením kovu drátu se substrátem a tedy výbornou přilnavostí. Metoda lze používat operativně v terénu, kvalita je ale ovlivněna manuální zručností svářeče. Drát ale také může být nataven laserem, nebo se používá kovový prášek. Rozdíl je především v ceně, protože výroba kvalitního kovového prášku je oproti kovovému drátu mnohem nákladnější. V případě kovových prášků se v průmyslovém měřítku používá kontinuálních laserů. Prášek prochází svazkem laseru, který jej roztaví a zároveň nataví podklad,

na který prášek dopadá. Vrstva má výbornou přilnavost a nebývá problém s pórovitostí. Poskytuje také korozivní ochranu. Při procesu se také dobře kontroluje tepelný vliv na substrát, což je dáno možností proces přerušit. Zaručena je také přesnost a kontrola, tj. opakovatelnost [1].

První část této práce se zabývá přetavováním povrchu plechu pulsním Nd:YAG laserem. Jde o proces, během něhož je absorbována část záření laseru povrchem plechu. Povrch se zahřívá, až dosáhne teploty tavení. Z natavené oblasti, která má vzhledem k šířce nízkou hloubku, je rychle odváděno teplo a dochází tak k prudké krystalizaci, která vede ke změně materiálových vlastností povrchu plechu. V případě ocelí zvyšuje povrch svoji tvrdost na úkor houževnatosti.

Je důležité určit vhodnou hustotu plošné energie, což v našem případě znamenalo určit, jak daleko od roviny plechu bude rovina ohniskové vzdálenosti. Cílem je najít takovou ohniskovou vzdálenost, aby přetavená oblast měla dostatečnou hloubku, protože běžně bývá povrch zabrušován, a byla dostatečně rovnoměrná po celé ploše.

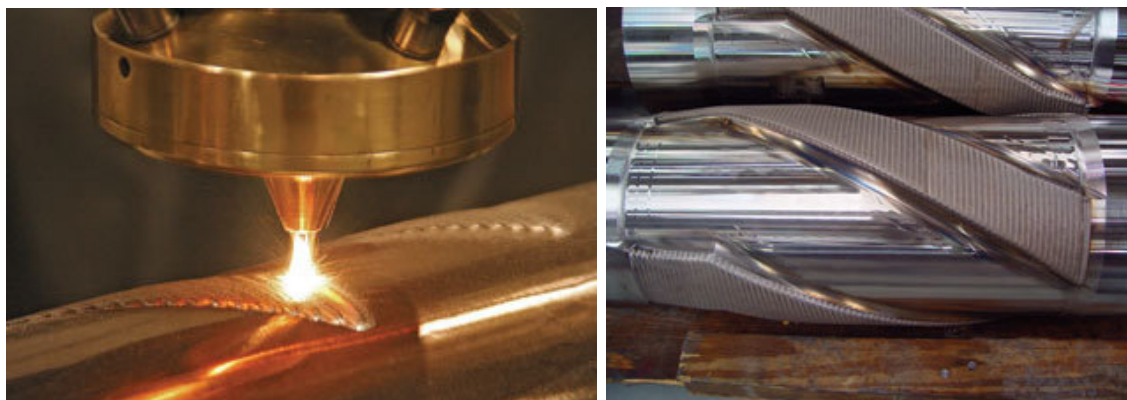
Druhá část se věnuje navařování kovového prášku kontinuálním diodovým laserem. Cílem je zjistit vliv předehřevu substrátu, na který je prášek navařován, na materiálové vlastnosti. Především se práce zabývá tvrdostí a pórovitostí. Zkoumá, jestli lze prokázat jistý trend při změně teploty substrátu až o téměř 300 °C.

1 Laserové navařování kovového prášku

Použití laseru k opracování povrchů přináší mnoho výhod oproti jiným metodám. Například při kalení je často potřeba, aby ke změně struktury došlo pouze v ohraničené oblasti povrchu, tedy je nutné kontrolovat hloubku tepelného ovlivnění. A právě laser toto umožňuje, protože je možné snadno nastavit jeho parametry jako jsou výkon, vzdálenost od ohniska a rychlost kalení. Navíc díky umístění laserové hlavy na robotické rameno je možný přístup do míst, kde by lokální kalení bez použití laseru nebylo možné (MATEX PM, s.r.o.).

Další možností je povrchové vzorkování. Při této metodě dochází k natavení jistého vzoru na povrch součásti. Přetavený povrch získá hrubší profil nebo může dojít k vypálení do hloubky. Poté lze oblast mírně zabrousit tak, aby byl zachován nově vzniklý vzor. Touto aplikací lze docílit samomazných ploch, které tak mohou zvyšovat účinnost stroje. Na třecích plochách se udrží více mazadla, čímž se sníží tření.

Navarování laserem našlo velké uplatnění v případech, kdy je součást vystavena agresivnímu prostředí. Například je namáhána teplotními cykly s velmi nízkými a vysokými teplotami nebo je vystavena korozivnímu prostředí, abrazivním částicím či kavitaci v kapalině. Dále může být potřeba součást opravit. Příkladem může být poškozená lopatka turbíny. Poškozená část se vyhladí tak, aby byly odstraněny praskliny, a následně navařením prášku vhodného složení dojde k rekonstrukci lopatky. Poté se povrch nově vzniklé části obrobí do původního tvaru. Tímto postupem lze také zachránit špatně obrobené výrobky. Nebo kupříkladu je jisté, že díl bude v konkrétní části mechanicky odírán. Pouhé vytvrzení povrchu by nestačilo. Proto je vhodný návar, který lze snadno obnovit poté, kdy dojde k jeho obroušení natolik, že hrozí poškození původního materiálu - substrátu.



Obrázek 1.1: Proces navařování prášku (vlevo) [2] a výsledný návar (vpravo) [3].

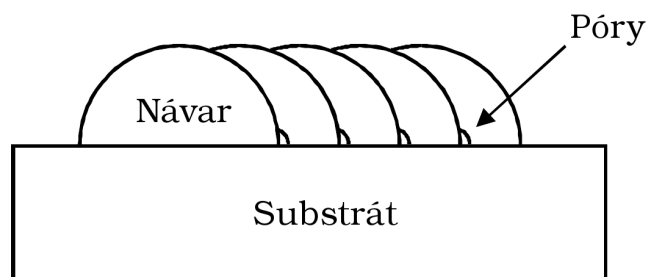
Při navařování má nejdůležitější roli laser. V dnešním průmyslu se používají především kontinuální diodové lasery. Ty mají oproti dříve používaným CO₂ laserům a Nd:YAG laserům mnohem vyšší účinnost a jsou snazší na údržbu. Dosahují tedy vysokých výkonů při menších nákladech. Oproti jiným typům ale mají diodové resp.

polovodičové lasery nižší kvalitu svazku. To však při kalení a navařování není jejich nevýhodou. Při těchto aplikacích je právě nutné mít svazek s vysokou energií, která je rovnoměrně rozprostřena na definované ohraničené ploše zejména ve tvaru kruhu a obdélníku. Vysoký výkon také umožňuje větší dopadovou plochu svazku.

Tyto vlastnosti umožňují intenzivní teplotní ovlivnění, které je dobře ohraničené. Proto je možné kovový prášek při navařování sypat přímo do cesty svazku. Část energie svazku se spotřebuje na přehřátí až roztavení prášku a část je absorbována povrchem, který se nataví. Natavení dosahuje nízké hloubky díky intenzitě a rychlosti posunu svazku. Zbývající energie je odražena. Tyto ztráty lze ovlivnit povrchovou úpravou, která zvýší absorpci, a nebo okolní teplotou.

V důsledku kontaktu kovů (substrát a prášek), jejichž plochy jsou obě natavené, vzniká vysoce přilnavá vrstva. Tavenina vzniklá z prášku při průchodu svazkem poté, kdy přestane být v dosahu tepelného vlivu laseru, se velmi rychle ochlazuje, čímž vzniká tvrdá až martenzitická vrstva.

Ve většině případech se zpracovávají větší plochy. Prášek je navařován v řadách, které se překrývají, případně ve vrstvách (obr. 1.1). Díky možnosti vrstvení lze vytvořit velmi tlusté návary. Obvykle je do oblasti pod pracovní hlavou navíc vháněn ochranný inertní plyn, který brání před korozí. Během překryvu by se totiž pod taveninou zachytával vzduch, který by snižoval kvalitu (obr. 1.2). Vzniku těchto pórů nelze zcela zabránit, lze jej však ovlivnit pracovním postupem. Výsledná navařená vrstva se obvykle obrobí do požadované tloušťky (návar je tedy vždy tlustší) a přítomné velké trhliny se vybrousí a opětovně zaplní návarem a znovu zabrousí.

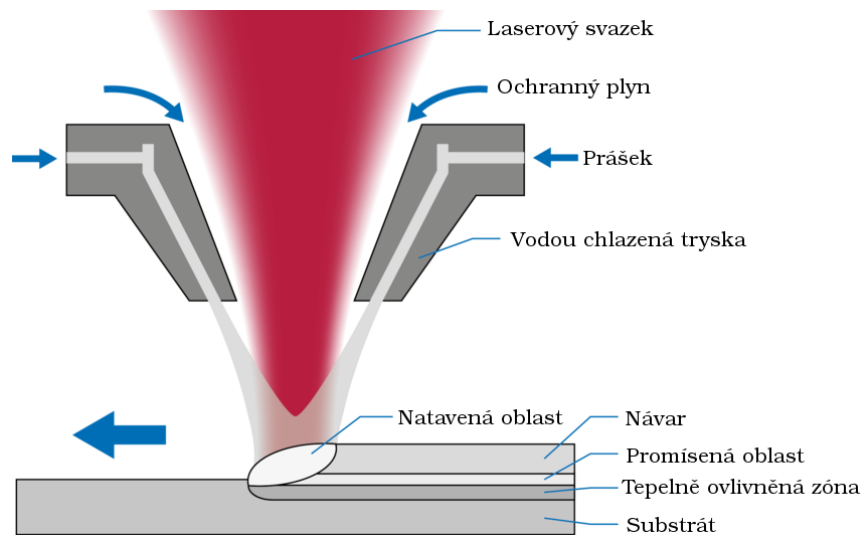


Obrázek 1.2: Pórovitost mezi jednotlivými řadami návaru (upraveno dle [4]).

Stejně jako u kalení lze svazek z laseru vyvést optickým vláknem do laserové hlavy, která se umístí na robotické rameno a s tím získat příslušné výhody zvláště při práci s těžkými součástmi. Kruhově symetrické součásti lze uložit na rotační stůl a svazkem pohybovat pouze na ose od středu.

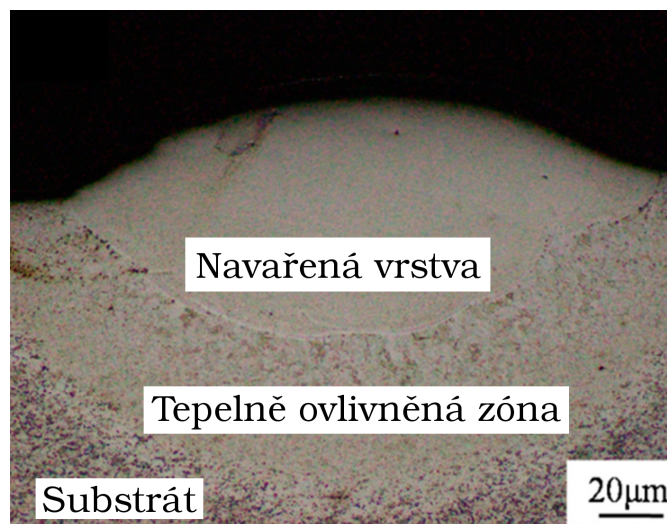
Existují dva přístupy jak dostat kovový prášek na substrát. V prvním případě je prášek umístěn již na součásti, což omezuje proces z hlediska manipulovatelnosti. Jde o dvoustupňový proces. Prášek je potřeba na substrátu udržet vhodným chemickým pojivem, aby odolal vlivu gravitace a hlavně tlaku ochranného plynu, který je vháněn do natavované oblasti. Druhý způsob je mnohem praktičtější. Prášek je koncentrován v zásobníku, odkud je vlivem gravitace sypán nebo inertním plynem skrze trysky vháněn přímo do svazku laseru a do taveniny. Schéma způsobu umístění vývodu trysek ze sypače prášku je na obrázku 1.3.

Během procesu dochází k promísení se substrátem, které je pro laserové navařování velmi nízké (obvykle do 10 %). Poměrem plochy této oblasti ku celkové ploše obsahující prášek, tj. promísené oblasti i oblasti nad ní, se hodnotí i kvalita návaru [5]. Promísení hraje důležitou roli v přilnavosti vrstvy. Přitom nehraje roli objem, ale kontaktní



Obrázek 1.3: Schéma procesu navařování prášku laserem (upraveno dle [6]).

plocha. Pod promísenou oblastí je tepelně ovlivněná oblast. Ta díky zmíněným výhodám laserového navařování, jako jsou vysoká intenzita svazku a rychlost ochlazování, nezasahuje příliš hluboko do substrátu (obr. 1.4).

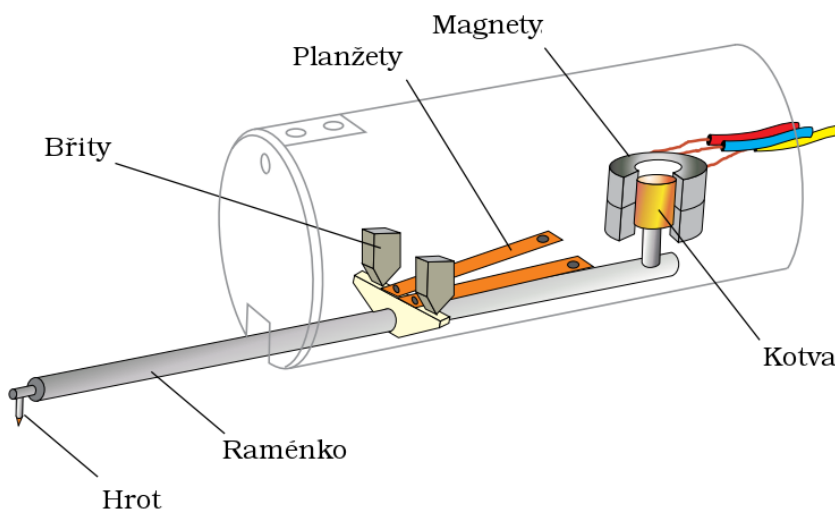


Obrázek 1.4: Metalografická fotografie příčného řezu navařené housenky (upraveno dle [7]).

2 Použité přístroje a metody

2.1 Kontaktní profilometr

Kontaktní profilometr Form Talysurf Series 2, který se používá pro zjišťování povrchu pevných látek, funguje na principu indukčního měření pohybu diamantového hrotu umístěného na konci raménka. Vzorek je umístěný na posuvném stole v rovině xy a ten se pohybuje vzhledem k raménku. Raménko vykonává vertikální pohyb, čímž kotva (kovový váleček) umístěná na jeho konci uvnitř dvou prstencových magnetů indukuje elektrický proud, který je dále zpracován. Schéma indukčního snímače je na obrázku 2.1 [8].



Obrázek 2.1: Schéma indukčního snímače [8] (upraveno dle [9]).

Mapování tedy probíhá ve vertikálních rovinách xz, které jsou od sebe vzdáleny o $1 \mu\text{m}$ na ose y [8]. Složením zmapovaných rovin za sebe lze získat 3D rekonstrukci povrchu, kterou lze dále analyzovat programem Talymap 3.1.

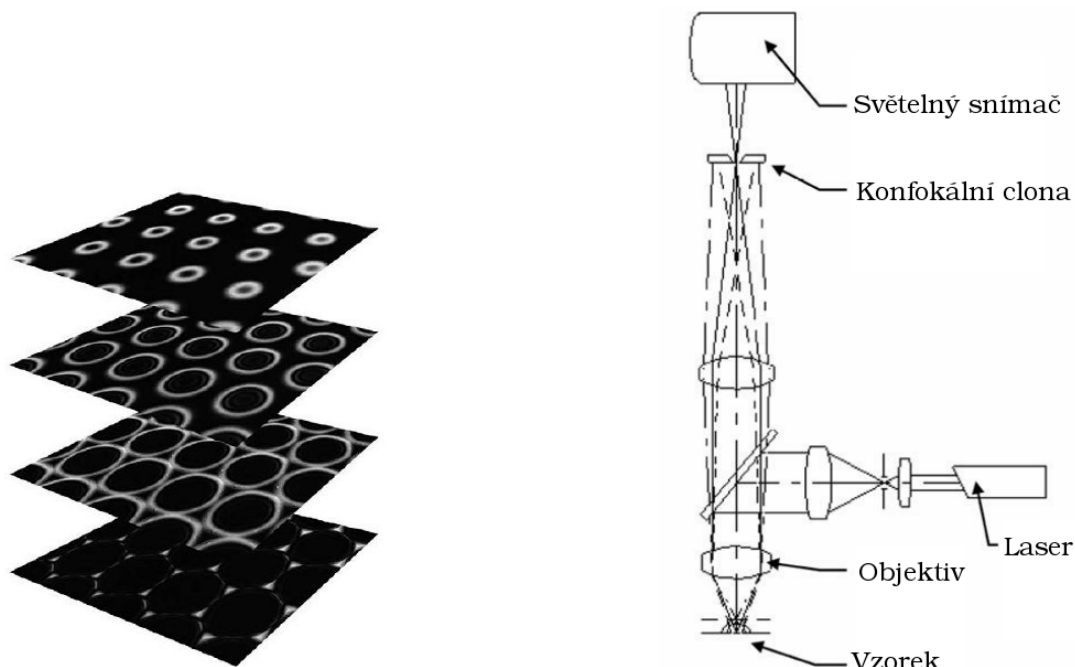
2.2 Konfokální mikroskop

Výhoda konfokálního laserového rastrovacího mikroskopu oproti klasickému optickému mikroskopu spočívá v odstranění vlivu jiných rovin mimo zaostřenou rovinu. V klasické mikroskopii je jimi obraz zkreslen, kdežto konfokální mikroskop je odstraní a navíc umožňuje vytvořit 3D model preparátu, který může mít nezanedbatelnou tloušťku.

Mikroskop funguje na principu postupného skenování rovin xy s posuvem v ose z. Zdrojem světla je laser, jehož svazek dopadá skrze konfokální (bodovou) clonu a objektiv na vzorek. Od něj se odrazí a putuje zpět přes objektiv na dělič svazku, odkud

pokračuje k bodové cloně, která odfiltruje nezaostřené roviny. Na konec svazek dopadá na světelný snímač, který signál zesílí a ten se dále zpracuje. Schéma takového mikroskopu je na obrázku 2.2. Jedná se tedy o nekontaktní nedestruktivní proces snímání povrchu.

Přístroj je schopen zachytit i 2D snímek v reálných barvách. Nicméně intenzitní snímek ze 3D skenu dosahuje vyšší hloubky ostrosti.



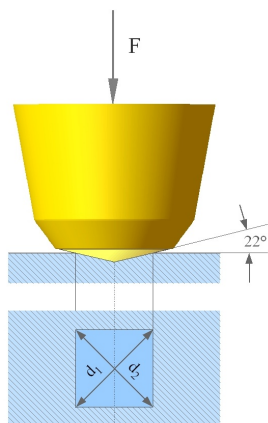
Obrázek 2.2: Princip snímání rovin (vlevo) a schéma konstrukce konfokálního mikroskopu (vpravo) (upraveno dle [8]).

2.3 Zkouška tvrdosti podle Vickerse

Tvrдость je jedna z mechanických vlastností materiálů, kterou lze zavést jako odpor vůči vnikání zkušební tělesa (indentoru) do povrchu materiálu. Vyjadřuje se v jednotkách pascálů, přičemž podle konkrétní zkoušky se tato jednotka modifikuje.

Existuje tedy mnoho způsobů, jak měřit tvrdost. Jednou ze statických zkoušek je právě Vickersova. Jedná se o zkoušku mikrotvrđosti (zkušební zatížení musí být menší jak 1 000 g) [10], která je sjednocena normou ČSN EN ISO 6507-1. Při testu se do povrchu vtlačuje diamantový indentor ve tvaru pravidelného čtyřbokého jehlanu se čtvercovou základnou. Předepsaný vrcholový úhel jehlanu je $136^{\circ} \pm 0,5^{\circ}$ (obr. 2.3). Doba zatěžování a uvolňování trvá od 2 s do 8 s. Mezi těmito procesy se indentor ponechává v klidu od 10 do 15 s, kdy dochází k tečení materiálu a zároveň jde o podstatu statické zkoušky.

Výsledná tvrdost HV se spočítá jako podíl zkušební síly ku ploše otisku jehlanu v povrchu. Dříve se síla vyjadřovala v kilopondech, po zavedení jednotek SI bylo nutné zkušební síly přepočítat na newtony zejména z toho důvodu, že by bylo náročné přeškálovat stupnice a vyměnit zkušební etalony. Proto je ve vztahu 2.1 síla dělená hodnotou gravitačního zrychlení g .



Obrázek 2.3: Schéma zkoušky tvrdosti podle Vickerse [11].

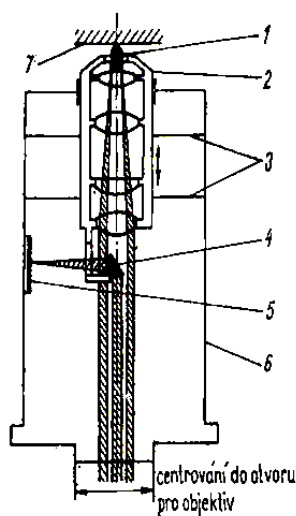
$$HV = \frac{1}{g} \frac{2F \sin \frac{\alpha}{2}}{d^2} \approx 0,189 \frac{F}{d^2} [\text{MPa}], \quad (2.1)$$

kde F je zkušební síla v jednotkách newtonů, d je aritmetickým průměrem úhlopříček jehlanu promítnutých do roviny v milimetrech, $g = 9,806\,65$ je převodní konstanta kompenzující sílu F dříve vyjadřovanou v kilopondech a α je vrcholový úhel jehlanu.

2.3.1 Hanemannův mikrotvrdoměr

Měření mikrotvrdosti vyžaduje hladký a leštěný povrch a hlavně přesné zatěžování spolu se stupnicí a také přesnou stupnicí při přeměřování délek úhlopříček. Hanemannův mikrotvrdoměr pracuje s cejchovanými pružinovými membránami. Na nich je zavěšen objektiv, ve kterém je přímo usazen diamantový indentor. Stupnice se nachází uvnitř objektivu a je třeba na ni zaostřit. Po provedení zkoušky se přestří na povrch výbrusu a jinou stupnicí se přeměří úhlopříčky vtisku.

Obecný mikrotvrdoměr na obrázku 2.4 se skládá z Vickersova indentoru (1), nosiče objektivu (2), závěsné talířové pružiny (3), optického hranolu (4), stupnice (5), krytu (6) a zkoušeného výbrusu (7) [12].

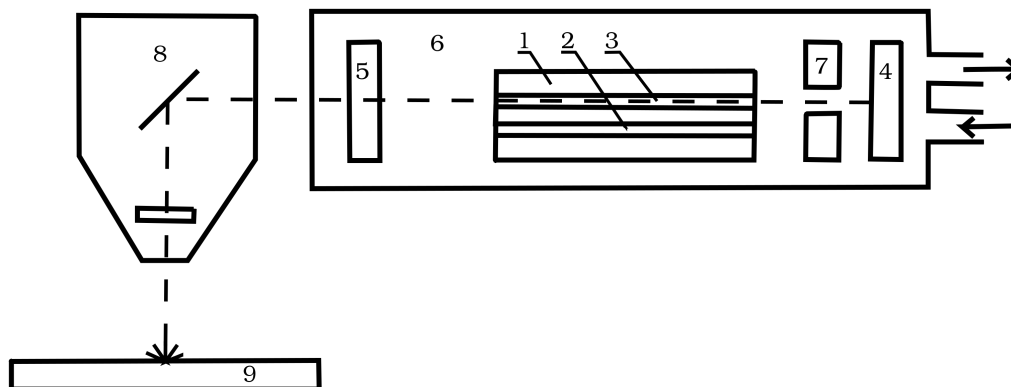


Obrázek 2.4: Schéma konstrukce Hanemannova mikrotvrdoměru [12].

3 Vlastnosti přetaveného povrchu v závislosti na parametrech laserového svazku

3.1 Nd:YAG laser a materiál

Byl použit pulsní pevnolátkový laser Nd:YAG čerpaný kryptonovou výbojkou. Vlnová délka laseru je 1 064,2 nm [13]. Na obrázku 3.1 vidíme schéma takového laseru. Základem je kavita (1) eliptického tvaru, v jejíchž ohniskových osách jsou umístěny kryptonová výbojka (2) a krystal yttrium aluminium granátu dopovaný neodymem (3) [13]. Na jednom konci je pak nepropustné posuvné zrcátko (4), které umožňuje měnit délku rezonátoru, na druhém konci je částečně propustné zrcátko (5). Všechny tyto prvky jsou chlazeny deionizovanou vodou [8], která odvádí teplo do vnějšího okruhu (6). Svazek, který je znázorněn přerušovanou čarou, je dále veden na clonku (7), kterou lze ovlivnit průměr svazku. Ten je nakonec optickou hlavou (8) vyveden na pracovní stůl (9).



Obrázek 3.1: Schéma pevnolátkového laseru.

Pracovním materiálem byl plech chrom-niklová austenitická nerezová ocel 1.4301 (AISI 304) o tloušťce 6 mm a rozměrech 40 mm × 120 mm. Její složení je podle normy ČSN 10088-1: chrom 17 % – 19,5 %, nikl 8 % – 10,5 %, uhlík < 0,07 %. Tato ocel se vyznačuje zvýšenou tvrdostí a pevností v tahu za cenu nižší houževnatosti. Ocel je odolná proti korozi, nicméně při tepelném ovlivnění je tato vlastnost oslabena, např. při svařování [14].

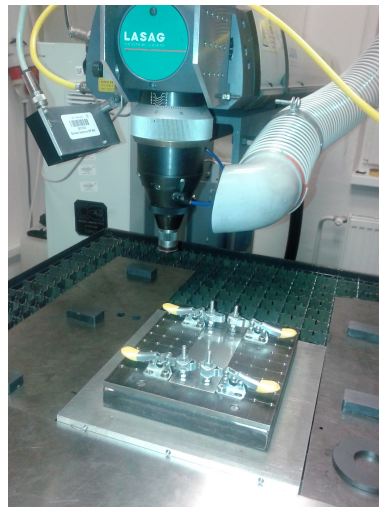
3.2 Experiment

Kvalita svazku laseru *BPP* byla $22 \text{ mm} \cdot \text{mrad}$. Napětí budící výbojky U bylo 180 V . Délka rezonátoru byla nastavena na 192 mm . Byla zvolena širší clona o průměru $5,8 \text{ mm}$ pro lepší zaostření svazku na výstupu. Teoretický průměr svazku v ohnisku D_0 byl $0,72 \text{ mm}$. Délka pulzu t byla 2 ms s frekvencí $f = 15 \text{ Hz}$. Odečtená energie E z displeje laseru byla $1,56 \text{ J}$. Vrcholový výkon byl roven podílu energie ku délce pulsu $PP = 780 \text{ W}$. Rychlost v , kterou se svazek pohyboval vůči plechu (v našem případě se pohyboval stůl), byla vypočítána ze vztahu [8]

$$v = fD(1 - PO) \quad (3.1)$$

na základě požadovaného překrytí pulzů $PO = 80 \%$. Stůl se proto pohyboval rychlostí $v = 1,8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Ochranným plynem byl argon s průtokem $7 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$.

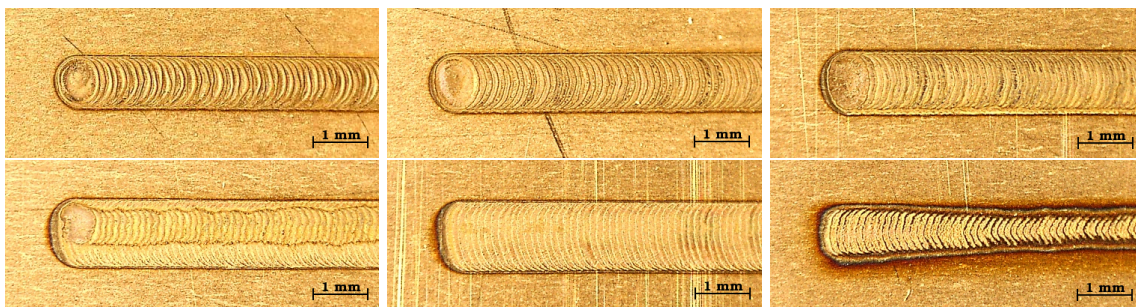
Cílem bylo zjistit nejvhodnější rozsah vzdálenosti z pro přetavení povrchu tak, aby přetavená oblast měla nízké výškové extrémy. Vzdálenost z byla definována jako vzdálenost roviny dopadu svazku od ohniskové roviny svazku. Prvním úkolem tedy bylo zjistit vhodný interval z pro bližší zkoumání. Proto byly vytvořeny stopy ve vzdálenosti 0 mm až 17 mm od ohniska s krokem 1 mm . Vzdálenost z byla dopočítána triangulací, přitom délka přepony byla dána laserovým měřidlem vzdálenosti uchyceným na hlavě laseru. Tepelný vliv svazku na plech se však mohl projevit jeho pokroucením. Tomu se zabránilo upevněním plechu do stabilní konstrukce, kterou spolu s laserovým měřidlem ukazuje obrázek 3.2. Celková nejistota z tak byla menší než desetina milimetru.



Obrázek 3.2: Nastavení experimentu.

Plech byly očištěny lihem a následně na každém vzorku vznikaly 4 lineární paralelní stopy o délce 15 mm vzdálené od sebe 20 mm . Ke každé stopě byl 5 mm od jejího konce vyslán pětkrát puls do jednoho bodu pro orientační zjištění intenzitního profilu svazku.

Pro vzdálenost z od 0 mm do 3 mm byly stopy pokryty kapkami taveniny. Od 4 mm do 7 mm vykazovaly stopy výrazně vlnitý profil, který byl vzhledem k povaze experimentu shledán nevhodným pro příliš velkou plošnou hustotu energie. Proto se dále pokračovalo se stopami se vzdálenostmi od 8 mm do 12 mm (obr. 3.3). S dalším oddalováním od ohniska se dostala do popředí závislost na aktuální teplotě plechu, stopa proto nebyla rovnoměrná (obr. 3.3 vpravo dole). Od $z = 15 \text{ mm}$ docházelo pouze ke kalení.



Obrázek 3.3: Stopy přetaveného povrchu plechu s různými vzdálenostmi z od ohniska - horní řada zleva: 8 mm, 9 mm, 10 mm, dolní řada zleva: 11 mm, 12 mm, 14 mm.

3.2.1 Měření šířek přetavených stop

Šířky stop byly měřeny digitálním mikroskopem Newbrand NB-MIKR-300 se zvětšením v rozsahu $30\times$ až $300\times$. Ten byl ovládán skrze USB port softwarem MicroCapture Pro Software. Na posledních třech milimetrech každé stopy byly $6\times$ měřeny průměry primárního přetavení D_p a sekundárního přetavení D_s . Výsledné průměrné šířky stop shrnuje tabulka 3.1. Spolu s naměřenými průměry jsou uvedeny i teoretické hodnoty D_t . Ty vychází ze vztahu[8]

$$D_t = \sqrt{D_0^2 + (\Theta z)^2}, \quad (3.2)$$

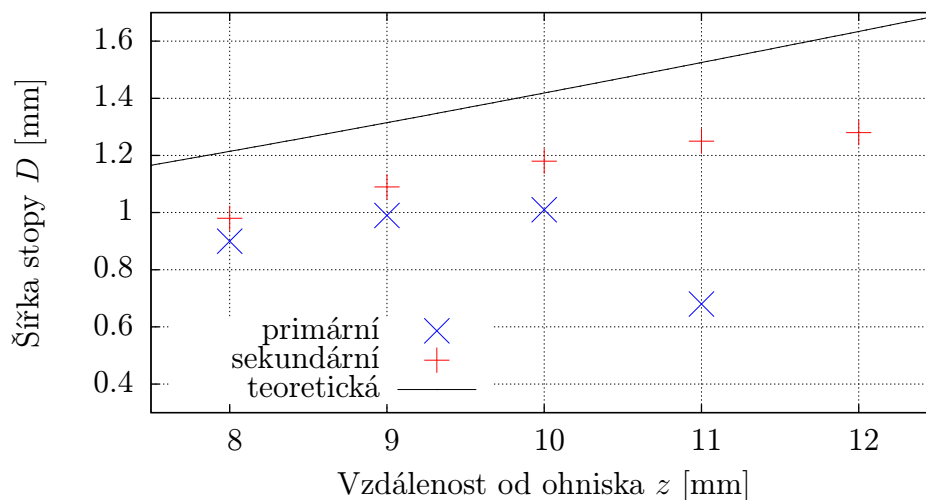
kde D_0 je průměr svazku v ohniskové rovině, Θ je divergence svazku, kterou lze vyjádřit ze vztahu[8] $BPP = \frac{D_0\Theta}{4}$, a z je vzdálenost roviny dopadu od ohniska svazku.

Tabulka 3.1: Průměrné šířky primárních a sekundárních stop v porovnání s teoretickými hodnotami v závislosti na vzdálenosti od ohniska z .

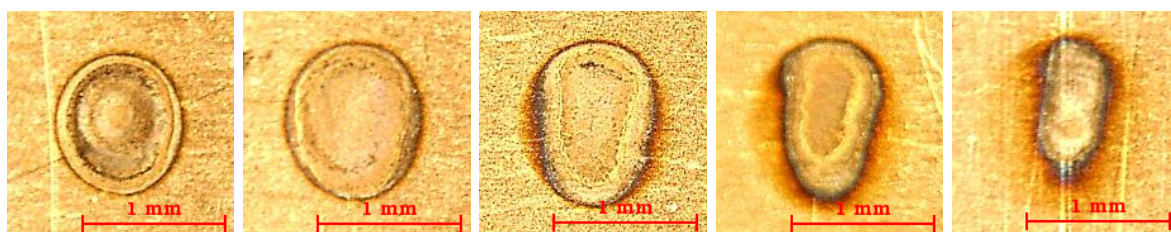
z [mm]	D_p [mm]	D_s [mm]	D_t [mm]
8	$0,9000 \pm 0,0011$	$0,9800 \pm 0,0015$	1,21
9	$0,9900 \pm 0,0023$	$1,0900 \pm 0,0018$	1,31
10	$1,0100 \pm 0,0028$	$1,1800 \pm 0,0021$	1,42
11	$0,680 \pm 0,014$	$1,250 \pm 0,004$	1,53
12	-	$1,2800 \pm 0,0023$	1,63

Rozdíl mezi sekundární a teoretickou šířkou ukazuje graf na obrázku 3.4. Ten je způsobený jednak ztrátami, ale zejména nižším předehřevem resp. nižší teplotou plechu od podélné osy stopy. Potom je plošná hustota energie nedostatečná pro přetavení povrchu.

Zdálo by se, že tento efekt se projevuje také na tvaru otisků pulsu, které jsou s rostoucím z deformovány. Podíváme-li se ale na sérii 5 pulsů v jednom bodě pro různá z (obrázek 3.5), pak uvidíme, že se tak děje v důsledku kruhové nesymetrie pulsu.



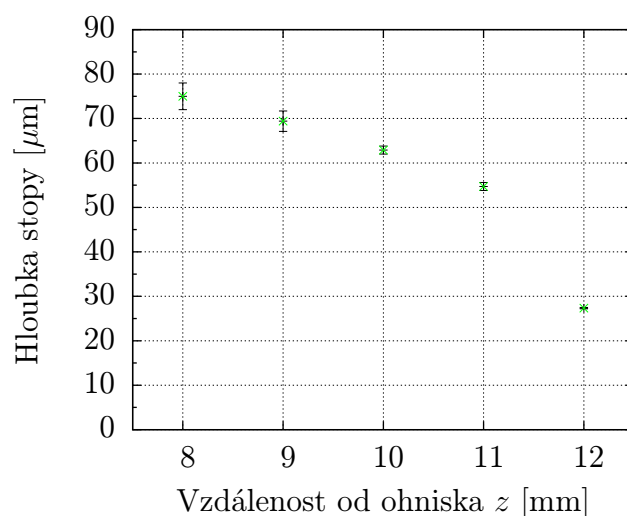
Obrázek 3.4: Závislost šířky přetavené stopy na vzdálenosti z od ohniska.



Obrázek 3.5: Otisky série pěti pulsů pro různé vzdálenosti z od ohniska, zleva: 8 mm, 9 mm, 10 mm, 11 mm a 12 mm.

3.2.2 Měření hloubek přetavených stop

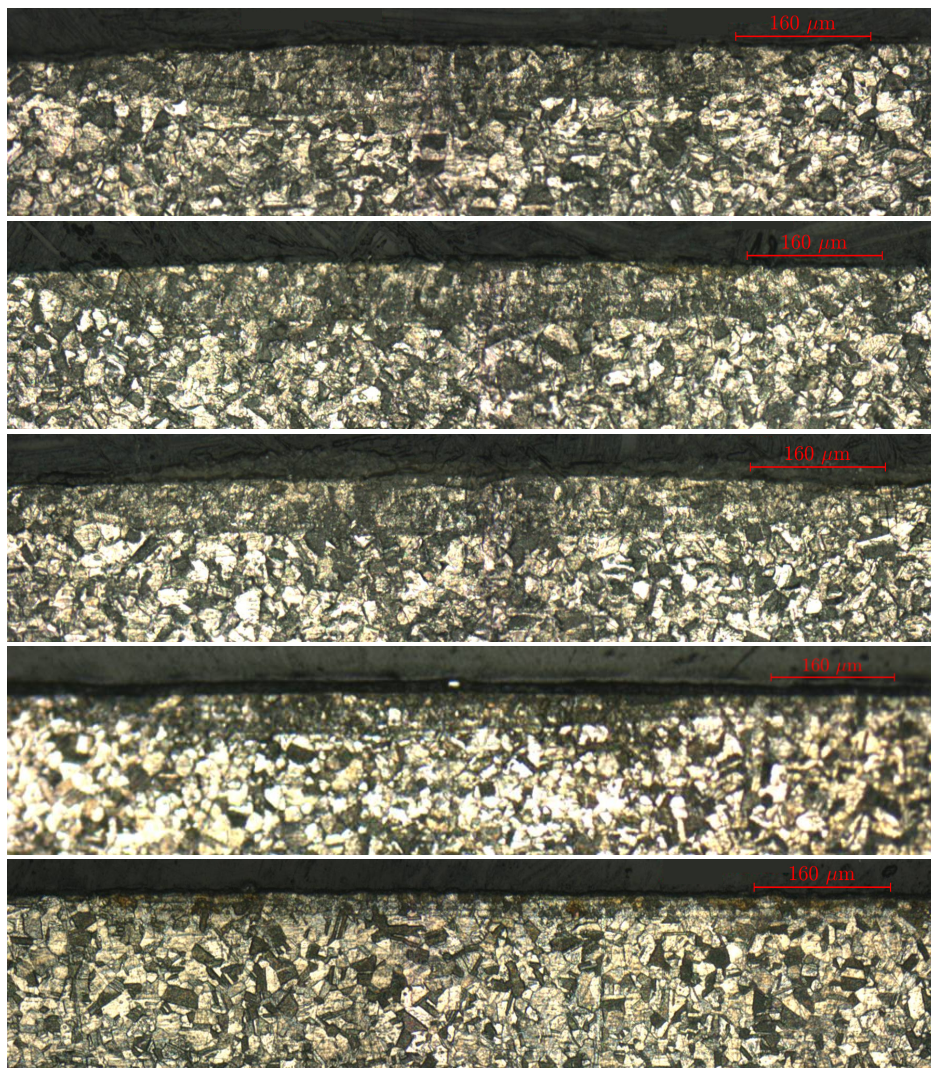
Aby bylo možné vyšetřit, jak hluboko dosahovaly natavené stopy, bylo nutné z nich vytvořit metalografické vzorky. Plechy proto byly nařezány na obdélníky o rozměrech 10 mm × 10 mm, které byly následně zality pryskyřicí do válcových nádob. Válečky byly po zaschnutí broušeny a leštěny. Přitom na leštěné straně byly příčné řezy z pohledu od konce stopy. Na závěr byly vyleštěné řezy naleptány lučavkou královskou.



Obrázek 3.6: Závislost hloubky přetavené stopy na vzdálenosti z od ohniska.

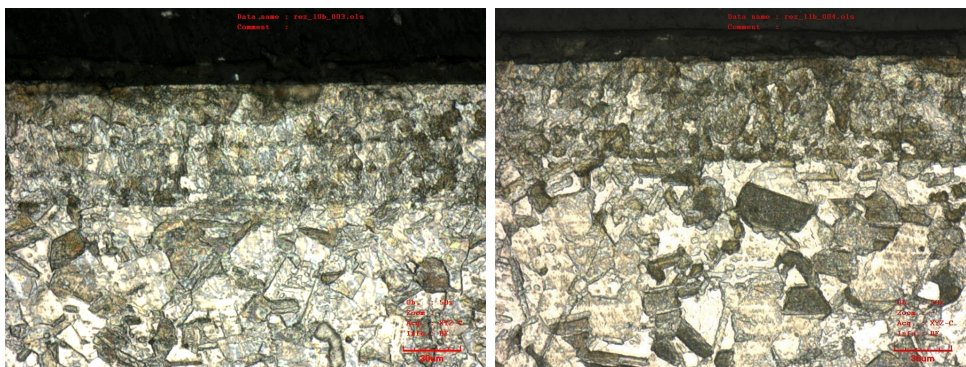
Vzorky byly poté postoupeny na laserový konfokální skenovací mikroskop LEXT, kterým byly pořízeny snímky řezů (obr. 3.7). Při bližším pohledu na řezy lze vidět důsledek nesymetričnosti pulsu, který se způsobuje výraznější přetavení do hloubky v levé části průřezu.

Hloubky byly měřeny ve středu řezu stopy pomocí programu Inkscape (graf na obr. 3.6). Z grafu je zřejmý nelineární pokles přetavení materiálu do hloubky v rostoucí vzdálenosti od ohniska. Je možné, že při širším zkoumání vzhledem k z by se projevil kvadratický charakter křivky, tedy úbytek absorbované energie plechem s kvadrátem vzdálenosti od ohniska. K obrázkům je třeba dodat, že profil řezu byl závislý na místě řezu, proto i naměřené hodnoty se mohou mírně lišit od skutečného průměru.



Obrázek 3.7: Příčné řezy stop pro různé vzdálenosti z od ohniska, zeshora: 8 mm, 9 mm, 10 mm, 11 mm a 12 mm.

Metalografický řez jasně ukazuje pulsní charakter stopy (obr. 3.8), složení přetavení oblasti lze lehce odlišit od zbytku materiálu, který neprošel fázovou změnou. Navzdory přetavení si vzorky pro daná z zachovaly lokální shluky zrn stejného chemického složení, které přesahují hranice opětovných přetavení pulsem.



Obrázek 3.8: Details řezů stop pro vzdálenosti $z = 10$ mm a $z = 11$ mm, červená škála je rovna $30 \mu\text{m}$.

3.2.3 Měření profilu povrchu přetavených stop

Struktura povrchu každé stopy (2,2 mm na šířku, 3,5 mm na délku) byla získána kontaktním profilometrem TALYSURF (RNDr. Helena Hiklová). V programu TALYMAP se zvolil 1 mm dlouhý shodný úsek pro všechny stopy, na kterém bylo změřeno 30 příčných profilů. Z nich program vypočítal průměrný profil (obrázek 3.9). Z průměrného profilu, kterým je vždy prostřední červená křivka, byla odečtena programem Inkscape šířka stopy. Ta byla měřena od prvního lokálního minima zleva do prvního lokálního minima zprava. Výjimka nastala u stopy pro $z = 11$ mm, kde se měřilo od druhého lokálního minima zleva, jelikož prvním extrém byl považován za anomálii.

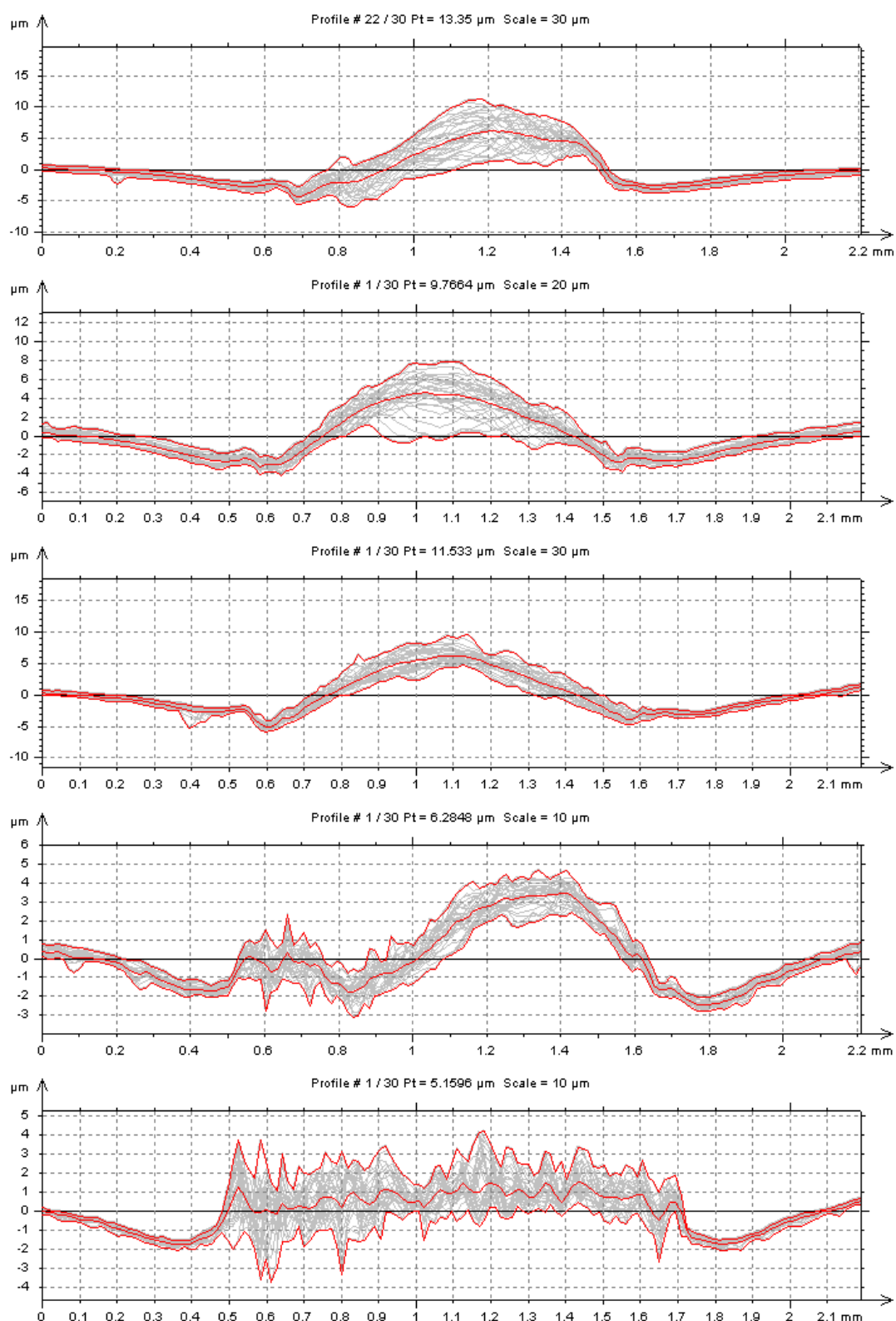
Výsledky měření šířek stop získané zvolenou metodou průměrování povrchového profilu (tab. 3.2) se ukázaly být v porovnání s mikroskopickou metodou méně přesné, resp. mají menší vypovídající hodnotu. Pokud jde o shodu s teorií, té se více přibližuje mikroskopická metoda, jak ukazuje graf na obrázku 3.10. V důsledku toho můžeme ze získaných dat ohledně šířky stopy vyčíst pouze její růst.

Tabulka 3.2: Průměrné šířky stop získané povrchovým měřením v porovnání s teoretickými hodnotami v závislosti na vzdálenosti od ohniska z .

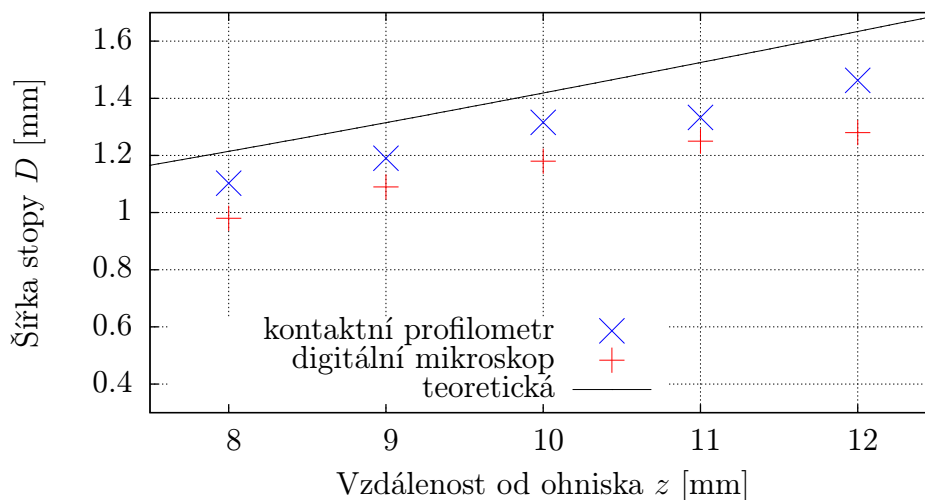
z [mm]	D_k [mm]	D_t [mm]
8	$1,103 \pm 0,005$	1,21
9	$1,190 \pm 0,013$	1,31
10	$1,316 \pm 0,007$	1,42
11	$1,333 \pm 0,013$	1,53
12	$1,463 \pm 0,008$	1,63

Nicméně další zjištění získáme pohledem na vývoj profilu s rostoucím z . Rozdíl nejvyššího a nejnižšího bodu průměrné křivky pro $z = 9$ mm je vyšší než pro $z = 8$ mm. Tato zvláštnost je velmi pravděpodobně způsobena malou rozsahem měření oblasti, která zabírala jen několik otisků pulsu. Pokud by byl zvolen větší rozsah nebo by se úsek posunul pro všechny ve stejném směru, mohl by se tento rozdíl překlomit na druhou stranu, nebo by se objevil jinde. Pro zbylá z rozdíl klesá.

Aby bylo možné nějaký rozdíl vůbec pozorovat, musel být materiál odněkud odebrán a jinde přidán. Pak ale, budeme-li považovat plech původně za rovný, i vnější



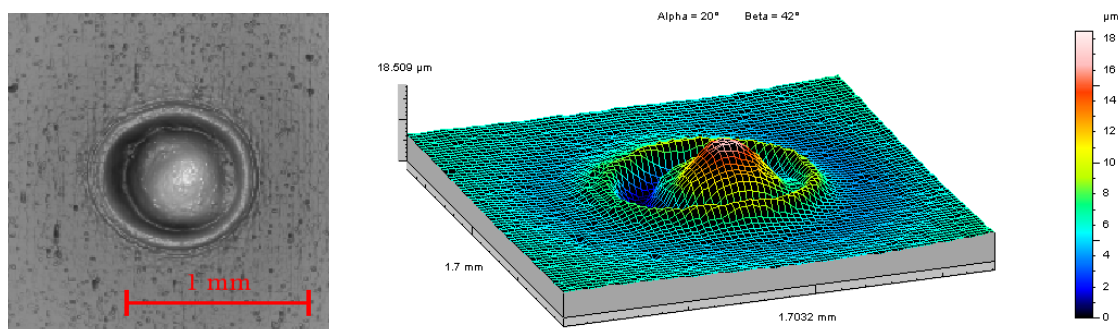
Obrázek 3.9: Profily povrchu stop pro různá z : seshora 8 mm, 9 mm, 10 mm, 11 mm a 12 mm, prostřední červená křivka značí průměrný profil.



Obrázek 3.10: Závislost šířky přetavené stopy získané povrchovým měřením na vzdálenosti z od ohniska.

okraje minim směrem od osy stopy musely být nataveny. Povrchové měření však nemělo takový interval, aby tečny na okrajích byly paralelní, resp. aby se překrývaly. Proto nelze přesně určit tuto hranici. Nicméně šířka takto nataveného materiálu se ve všech případech pohybuje okolo 2 mm a více. Přitom mikroskopem měřené šířky přetaveného materiálu se pohybovaly okolo 1 mm a více. I teoretická hodnota průměru svazku dopadajícího na plech nepřekročila 1,7 mm pro $z = 12$ mm. Krajiní oblasti jsou tedy pravděpodobně otisky silového působení svazku dopadajícího na plech předeřtáý předchozími pulsy. Řešená oblast byla proto částečně natavena [15]. Na několika mikrofotografiích příčných řezů byla dokonce s obtížemi pozorována. Skutečnost, že jde právě o částečně natavený povrch podporují i zmíněné mikrofotografie, na nichž sice nebyla měřena šířka přetavené oblasti, přesto lze z obrázků 3.7 odečíst, že se shoduje s mikroskopickým měřením (tab. 3.1).

Kontaktním profilometrem byl také změřen otisk pěti pulsů, který byl vytvořen u konce každé stopy. Byl vybrán nejbližší k ohniskové rovině svazku $z = 8$ mm, protože z pěti možných měl nejvýraznější strukturu. Programem TALYMAP byla vytvořena foto-simulace (obr. 3.11 vlevo), na níž bílá místa patří nejvyšším bodům a černá nejnižším. Z toho můžeme odečíst, že svazek není kruhově symetrický a že jeho střed je vychýlený vůči vnější kružnici jedním směrem.



Obrázek 3.11: Foto-simulace (vlevo) a prostorové zobrazení (vpravo) sady otisků 5 pulsů v jednom bodě pro vzdálenost $z = 8$ mm od ohniska svazka.

To koresponduje s posunutím primárního natavení od osy stopy na obrázku 3.3 vlevo dole. Na obrázku 3.11 vpravo také pozorujeme první vedlejší maximum, na jehož vnějším okraji se nachází mírně prohloubené mezikruží. Jedná se o částečně natavenou oblast diskutovanou výše.

3.3 Vyhodnocení

Počáteční rozsah vzdálenosti mezi rovinou dopadu a ohniskovou rovinou od 0 mm do 17 mm byl zúžen na 8 mm až 12 mm. Při nižších vzdálenostech blízko ohnisku vznikaly nežádoucí kapičky taveniny, nebo byly příčné profily příliš nerovnoměrné. Pro $z > 12$ mm se začala výrazněji projevovat závislost na teplotě plechu, čímž se měnila šířka přetavené oblasti.

Ve vzniklých stopách byly zjištěny dva různé projevy přetavení pulsním laserem, primární a sekundární stopa. Z mikrofotografií rozdílů v jejich struktuře nešly určit. Z hlediska materiálových vlastností (tvrdost), které by z toho plynuly, by poté záleželo na požadovaných vlastnostech přetaveného povrchu.

Pokud se ale zaměříme na zjištěné výsledky experimentu, můžeme z nich určit nejvhodnější z pro primární přetavení a pro sekundární přetavení. Pro první případ lze určit z mezi 9 mm a 10 mm. Hloubky se neliší o více jak $10 \mu\text{m}$ a pohybují se od $60 \mu\text{m}$ do $75 \mu\text{m}$ (graf na obr. 3.6). Průměrné profily ale hlavně vykazují největší symetrii z vybraných vzorků s primárními stopami (obr. 3.9), což je vhodné pro plošné přetavení povrchu.

Z pohledu homogenity přetavení větší oblasti pro sekundární stopu je nejvíce vhodnou vzdáleností $z = 12$ mm. Hloubka je podstatně nižší než v předchozím případě, pouze $(27,33 \pm 0,15) \mu\text{m}$ (graf na obr. 3.6). A přestože jsou výškové rozdílů povrchu menší než $8 \mu\text{m}$ (obr. 3.9), tak při následném zabroušení, které je pro přetavení časté [15], by mohla nízká tloušťka vrstvy klást velké požadavky na přesnost.

4 Vlastnosti navařených vrstev v závislosti na přehřevu substrátu

4.1 Diodový laser, ocelový substrát a kovové prášky

Laserline LDM 3000-100 je diodový laser o maximálním výkonu 3,5 kW. Vysoký výkon polovodičových laserů je dosahován skládáním laserových diod o výkonu několika miliwattů do řad a sloupců. Oproti ostatním typům laserů je však kvalita svazku ($BPP = 40 \text{ mm} \cdot \text{mrad}$) na výstupu horší i přes kolimaci válcovými mikročočkami umístěnými na stěně každé diody [8]. V důsledku toho, a zároveň možnosti navyšovat výkon omezený schopností chladicího systému, jsou diodové lasery vhodnými nástroji v průmyslu pro povrchové úpravy materiálu (kalení, přetavování, navařování apd.). V těchto případech totiž není třeba svazek zaostřit na malou plochu a naopak se vyžaduje velká plocha (často obdélníkového tvaru) s rovnoměrně rozloženou energií. Další důležitou roli hraje účinnost diodových laserů, která dosahuje 50 % až 60 % [13]. Vlnová délka má rozsah 900 nm až 1 080 nm, což je běžné pro průmyslové diodové lasery. Provozní teplota laseru je od 10 °C do 40 °C.

Martensitický prášek Metco 42C kombinuje vlastnosti odolnosti vůči opotřebení a dopadové síle. Je odolný vůči korozi, což je typická vlastnost martenzitických ocelí. Metco 42C bývá aplikován tam, kde dochází k mechanickému namáhání za nízkých teplot, dobře odolává abrazi. Dále se navařuje na rotory palivových pump, písty, hydraulické tlumiče a jsou jím rekonstruovány poškozené díly. Prášek kromě železa obsahuje 0,18 % uhlíku, 17,0 % chromu a 2,0 % niklu. Pracovní teplota doporučená výrobcem by neměla přesáhnout 540 °C.

Ledurit 60 je také prášek na železném základu s obsahem uhlíku 4,1 %, 32,0 % chromu, 0,50 % křemíku a 0,8 % manganu. Po aplikaci povrch disponuje vysokou otěruvzdorností při minerálním otěru s malými rázy. Hodí se tedy na transportní šneky nebo bagrové zuby.

Ledurit 68 má oproti Leduritu 60 nižší obsah uhlíku - 3,8 %, ale kvůli 0,8 % wolframu dosahuje vyšší tvrdosti. Dále obsahuje 22,0 % chromu, 1,20 % křemíku, 0,8 % vanadu a 1,0 % boru. Tento tvrdší Ledurit se navařuje tam, kde dochází k extrémnímu smirkovému otěru, např. na mlecích válcích, skluzech a mísičích. Stejně jako Ledurit 60 se hodí na transportní šneky a bagrové díly.

Jako substrát byla použita ocel 12 050. Jedná se o nelegovanou ušlechtilou ocel určenou k zušlechťování (žíhání, povrchové kalení). Často se používá pro výrobu méně namáhavých strojních dílů. Obsahuje 0,40 % – 0,52 % uhlíku, < 0,43 % křemíku, 0,46 % – 0,84 % manganu, < 0,35 % fosforu, 0,040 % síry, < 0,45 % chromu, 0,13 % molybdenu a 0,45 % niklu.

4.2 Experiment

Svazek byl vyveden z laseru optickým vláknem do laserové hlavy. V rovině dopadu měl kruhový tvar o průměru 5 mm. Hlava byla umístěna na robotu, který umožňoval jednoduchou obsluhu. Na ni byly také připevněny 4 vývody sypače prášku, každý se nacházel v rohu pomyslného čtverce pod úhlem 30° k ose svazku (černé trubice na obr. 4.1 vlevo). Rychlost sypání byla 1,30 RPM. Ochranným plynem byl argon s tokem $12 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$ (modré trubice na obr. 4.1 vlevo). Výkon laseru byl 3,15 kW.

Prášky se navařovaly na ocelové hranoly. Navařeno bylo vždy sedm housenek vedle sebe o délce přibližně 6 cm až 7 cm ve třech vrstvách na sobě bez prodlevy. Rychlost hlavy pohybující se vůči hranolu byla $0,5 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$. Na obrázku 4.1 vpravo, kde je laser zachycen při práci, jsou patrné vysoké ztráty materiálu. Ty je možné redukovat opětovným použitím, nicméně kvalita prášku je prudce degradována a procesy zvyšující kvalitu jsou nákladné.



Obrázek 4.1: Laserová hlava při práci - prášek je sypán černými trubicemi rovnoměrně ze čtyř stran, na pozadí se nachází diodový laser Laserline (vlevo). Při navařování dochází k vysokým ztrátám materiálu a jeho degradaci (vpravo).



Obrázek 4.2: Návary na hranolu z oceli 12 050 zleva: Metco 42C, Ledurit 60 a Ledurit 68, délka návarů je mezi 6 cm a 7 cm.

Byly provedeny tři různé návary každého prášku na tři hranoly lišící se svojí teplotou. Hranol byl ohříván v peci na danou teplotu, která byla měřena bezkontaktním infračerveným laserovým teploměrem. Bylo třeba začernit konkrétní místo hranolu, aby byla zajištěna správná funkčnost teploměru. Teplota okolí byla 5 °C, což je o 5 °C méně než teplota doporučená výrobcem.

První návary byly provedeny na hranol o teplotě okolí, tj. $t_1 = 5$ °C. Další dva byly předeřívány na $t_2 = 150$ °C a $t_3 = 300$ °C. Výsledné navařené vrstvy s teplotou předeřevu 150 °C jsou na obrázku 4.2. Ostatní návary téhož prášku se vyjma počtu prasklin vizuálně nelišily.

4.2.1 Měření prasklin a pórů

Byly zvoleny dvě metody pro měření prasklin. První využila fotografie vzorků pořízené ze shora a měřila se délka povrchových viditelných prasklin. Druhá na základě snímků řezů pořízených konfokálním mikroskopem LEXT zjišťovala praskliny a póry, které byly řazeny do určených kategorií.

Povrchové praskliny

Protože byla pro každý prášek pořízena jedna fotografie zachycující všechny předeřevy, byly tak zaručeny stejné optické podmínky. Programem Inkscape byly změřeny délky všech viditelných prasklin, které byly poté sečteny do celkové délky l_t (tab. 4.1), kde dolní index značí teplotu předeřevu.

Tabulka 4.1: Sumy délek povrchových prasklin navařených prášků při dané teplotě předeřevu.

prášek	l_{t_1} [cm]	l_{t_2} [cm]	l_{t_3} [cm]
Metco 42C	0	$1,71 \pm 0,06$	$1,4 \pm 0,5$
Ledurit 60	$11,5 \pm 0,4$	$6,5 \pm 0,2$	$4,10 \pm 0,13$
Ledurit 68	$17,0 \pm 0,5$	$19,9 \pm 0,6$	$5,07 \pm 0,16$

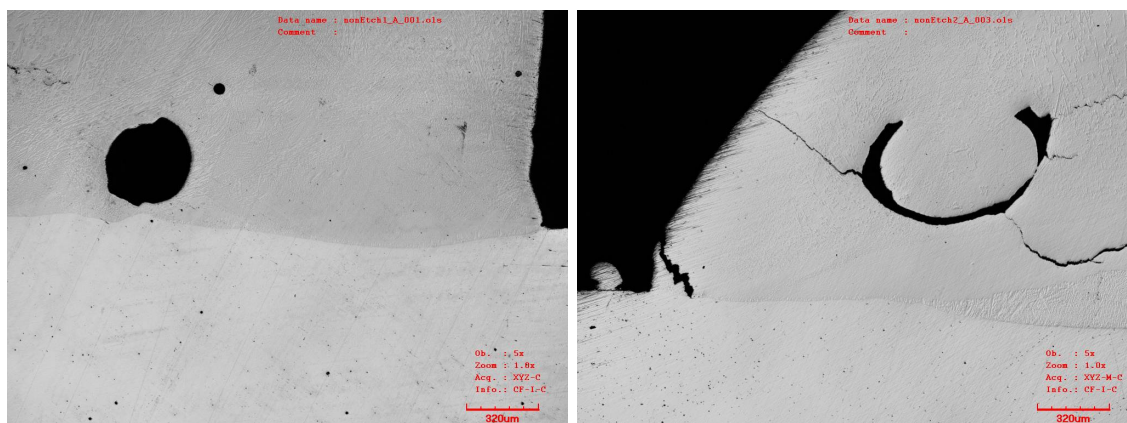
V případě prášku Metco 42C prakticky trhliny nebyly pozorovány vyjma na předeřevěch t_2 a t_3 po jedné částečné trhlíně na konci vzorku. Tvrdší Ledurity měly trhlín značně více. Většinou se jednalo o příčné, výjimečně o podélné praskliny. S rostoucí teplotou předeřevu u nich klesal počet prasklin, přestože u Leduritu 68 byla l_{t_2} delší než l_{t_1} , a spíše vznikaly ve směru příčném. Což při l_{t_3} u Leduritu 60 znamenalo celkově dvě příčné povrchové praskliny a tři u Leduritu 68.

Měření prasklin a pórů v příčném řezu

Jednotlivé hranoly byly příčně rozřezány a jedna plocha od každého byla vyleštěna a naleptána pro metalografický rozbor. Takto připravené vzorky byly konfokálním mikroskopem LEXT po částech vyfotografovány ve 3D při zvětšení volitelného objektivu 5×. Z částečných fotografií byl sestaven celistvý obraz příčného řezu. Z intenzitního obrazu bylo poté možno odečíst trhliny a póry. Oba parametry byly rozděleny do tří kategorií. Velké trhliny byly vedeny od povrchu návary do oblasti substrátu a byly dlouhé přibližně 5 mm. Střední byly často uzavřeny v návary a byly delší jak 1 mm. Malé trhliny byly od 0,5 mm do 1 mm. Stejně rozlišeny byly póry, což byly dutiny

buď přibližně kruhové, nebo jen částečně. Tyto dutiny vznikly zachycením ochranného plynu taveninou.

V případě malých ($50 \mu\text{m} - 150 \mu\text{m}$) a středních ($150 \mu\text{m} - 500 \mu\text{m}$) pórů byl zachován přibližný kruhový tvar (obr. 4.3 vlevo). Povrchové napětí odolalo vnější tíhové síle taveniny a dutina si mohla zachovat nejmenší plochu. U velkých ($> 500 \mu\text{m}$) pórů docházelo však k překonání povrchového napětí a dutiny tak dostaly protáhlý, obloukový tvar (obr. 4.3 vpravo). Buď došlo k propadu a plyn byl z části nahrazen taveninou, nebo k úniku plynu nedošlo a pouze se dutina pod tlakem zploštila.



Obrázek 4.3: Příklady dutin v návaru: šířka dutiny vlevo je $386 \mu\text{m}$ a dutiny vpravo $881 \mu\text{m}$.

Důvodem k dolní hranici rozměru malých trhlin a pórů byla neschopnost rozlišit dutiny od škrábanců v důsledku broušení. Vzorky totiž nebyly ideálně vyleštěné a naleptané. Dalším problémem byla podobnost. Například zdali se jednalo o malou trhlínu nebo střední pór bylo rozhodováno na základě obrysu, tedy zdali byl hladký (střední pór) nebo potrháný (malá trhlína).

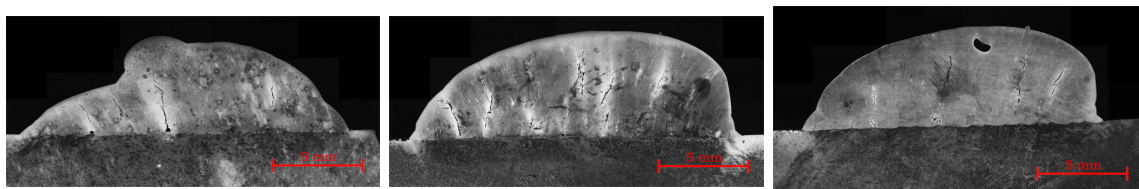
Tabulka 4.2: Sumy délek povrchových prasklin navařených prášků při dané teplotě přehřevu.

prášek	přehřev	trhliny			póry		
		velké	střední	malé	velké	střední	malé
Metco 42C	t_1	-	5	7	-	2	2
	t_2	-	11	18	-	1	4
	t_3	-	5	21	1	-	3
Ledurit 60	t_1	-	2	-	-	2	10
	t_2	2	-	4	5	7	6
	t_3	1	1	11	-	5	13
Ledurit 68	t_1	3	3	-	1	5	1
	t_2	3	-	1	2	-	22
	t_3	2	1	6	2	1	8

Z dat v tabulce 4.2 není možné potvrdit, zdali pórovitost či počet prasklin jsou nějakým způsobem závislé na teplotě přehřevu. S větším počtem vzorků by se zkoumaná plocha zvětšila natolik, aby v ní byl dostatečný počet prvků v každé kategorii.

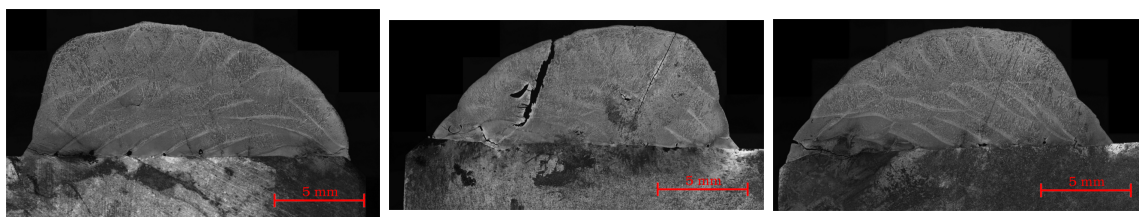
Pak by se možná nějaký trend projevil. Otázkou ale je, kolik by se takových vzorků muselo vytvořit, a zdali by pak nebyl vhodnější jiný způsob měření. Namísto prasklin a pórů by se pak mohli měřit důsledky procentuálního zastoupení těchto parametrů ve vzorcích, například abrazivním testem.

Ačkoli porovnávání počtu prasklin neprokázalo závislost na teplotě, podíváme-li se na to, jak jsou praskliny uspořádány, získáme tak jiné informace. Například na obrázku 4.4 je návar prášku Metco 42C. Výrazné praskliny jsou kolmo na řadu sedmi housenek. Nezasahují přes všechny tři vrstvy, tedy vznikají a zanikají v materiálu a povrch zůstává uzavřený. Vnitřní pnutí je rovnoměrně rozloženo.



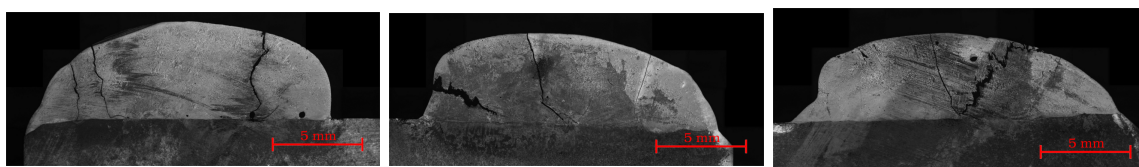
Obrázek 4.4: Mikroskopické intenzitní fotografie (LEXT) navařeného prášku Metco 42C při teplotě předehřevu zleva t_1 , t_2 a t_3 .

Podíváme-li se také na oblast, kde dochází k mísení prášku se substrátem, všimneme si trendu, který spojuje všechny tři prášky (obr. 4.5 a 4.6). Zdá se, že s rostoucí teplotou předehřevu se méně objevují póry, které snižují kontaktní plochu. Ty vznikají zachycením plynu při překrytí jedné další housenkou (obr. 4.7).



Obrázek 4.5: Mikroskopické intenzitní fotografie (LEXT) navařeného prášku Ledurit 60 při teplotě předehřevu zleva t_1 , t_2 a t_3 .

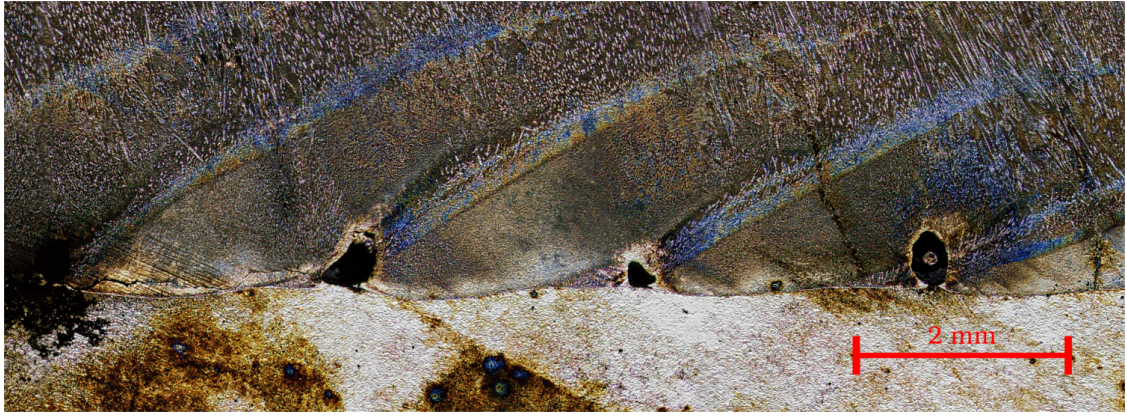
U vzorku Leduritu 68 s předehřevem t_1 je sice malý výskyt prasklin, nicméně kontaktní plocha je více pórovitá než zbylé dva vzorky. A přihlédneme-li k výsledku měření celkových délek povrchových prasklin, pak je zřejmé, že počet prasklin velmi závisí na místě provedení řezu.



Obrázek 4.6: Mikroskopické intenzitní fotografie (LEXT) navařeného prášku Ledurit 68 při teplotě předehřevu zleva t_1 , t_2 a t_3 .

4.2.2 Měření tvrdosti podle Vickerse

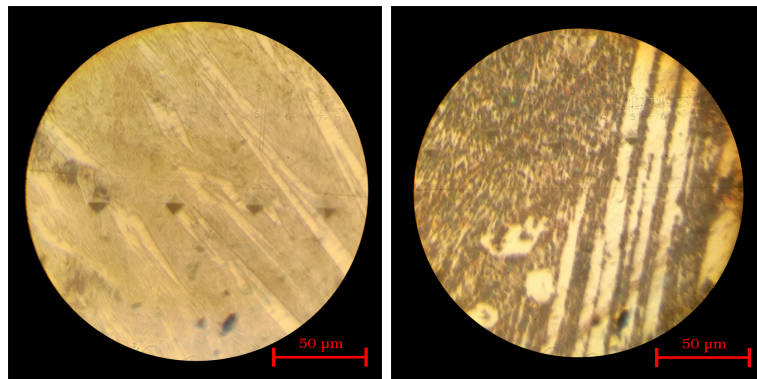
Zkouška tvrdosti byla provedena na Hanemannově mikrotvrdoměru. Nejprve byla nutná kalibrace přístroje, která byla rozdělena do dvou částí. Z kalibrace zátěže Haneman-



Obrázek 4.7: Mikroskopická fotografie (LEXT) zobrazující zachycený argon - Ledurit 68, přehřev t_1 .

novy hlavy vzešla konstanta úměry, kterou se bylo nutno počet dílků přenásobit, její hodnota byla 2,277. Druhá část spočívala v kalibraci objektivu. Při měření bylo použito největší možné zvětšení $20\times$, při kterém byl jeden dílek roven 160 nm.

Pro každý ze 12 vzorků včetně substrátu (bylo měřeno nejvzdálenější místo od tepelně ovlivněné oblasti návarem) bylo provedeno sedm vtisků (obr. 4.8). V některých případech bylo dále počítáno se šesti z důvodu nepravidelného tvaru otisku. Příčinou toho byla nehomogenní struktura, tj. indentor dopadl na hranici dvou zrn s rozdílnou tvrdostí. Časový interval lineárního zatížení a uvolnění byl 10 s. Doba působení zkušební síly činila 15 s. Počet dílků na stupnici působící síly byl vždy 20, to odpovídá síle 0,446 6 N.



Obrázek 4.8: Fotografie otisků na Leduritu 60 (vlevo) a Leduritu 68 (vpravo) při testu tvrdosti podle Vickerse.

Naměřené tvrdosti včetně nejistot jsou uvedeny v tabulce 4.3 a graficky je znázorňuje graf na obrázku 4.9. S rostoucí tvrdostí roste i nejistota výsledku. To odpovídá skutečnosti, kdy s větší tvrdostí je otisk indentoru v materiálu menší, a tak logicky roste i nejistota, která plyne z měření úhlopříček čtverce. V grafu je také patrný rostoucí trend pro oba Ledurity, ale vypočtené nejistoty jej zcela mažou. Z tohoto důvodu nelze jakoukoli závislost tvrdosti na teplotě přehřevu potvrdit.

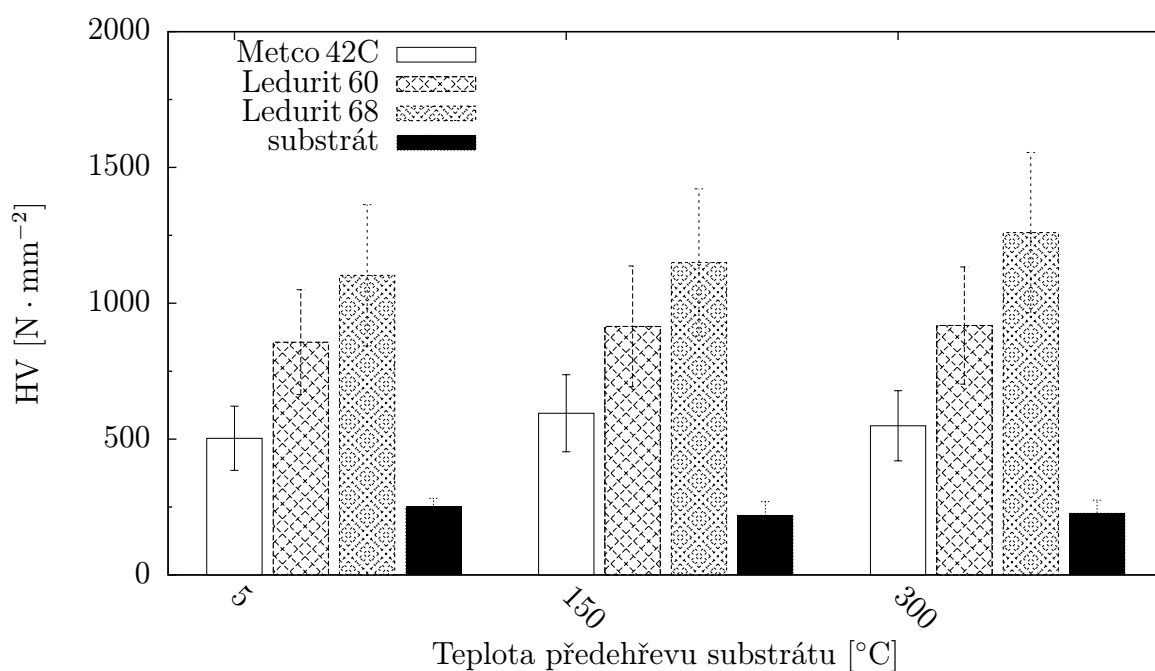
Očekáván byl trend klesající, jelikož vyšší teplotní rozdíl vede ke křehčímu a tvrdšímu materiálu s velkým vnitřním pnutím. Nejjednodušším vysvětlením je lokace na řezu, kde byly sady otisků pořizovány. Bylo vybíráno místo v prostřední řadě housenek

Tabulka 4.3: Tvrdosti navařených prášků podle Vickerse při dané teplotě přehřevu.

prášek	HV_{t_1} [$N \cdot mm^{-2}$]	HV_{t_2} [$N \cdot mm^{-2}$]	HV_{t_3} [$N \cdot mm^{-2}$]
Metco 42C	503 ± 118	595 ± 142	549 ± 129
Ledurit 60	857 ± 193	915 ± 222	918 ± 216
Ledurit 68	1103 ± 260	1150 ± 271	1260 ± 295
substrát	251 ± 31	219 ± 51	227 ± 48

tak, aby se nacházelo přibližně ve středu řezu housenky. Tato housenka ale byla navařena na již předešlou řadu, která měla mnohem vyšší teplotu než přehřívání hranol. Proto se pravděpodobně stalo, že rozdíl mezi těmito teplotami byl příliš malý na to, aby se projevil následně měřené tvrdosti. Samozřejmě se projevit mohl a byl ztracen v nejistotě. S tím je ovšem také potíž, protože zrnitá struktura deformuje čtvercový tvar vtisku a tím z principu zanáší výraznou chybu. Použití nanoindentoru je také nevhodné vzhledem ke zmíněné nehomogenní struktuře.

Vrátíme-li problému zkoumané lokace v řezu, pak se nabízí časově náročnější řešení. Bylo by třeba provést sérii měření napříč vrstvami. A je možné, že blíže ke kontaktu se substrátem by se závislost na přehřevu projevila více.



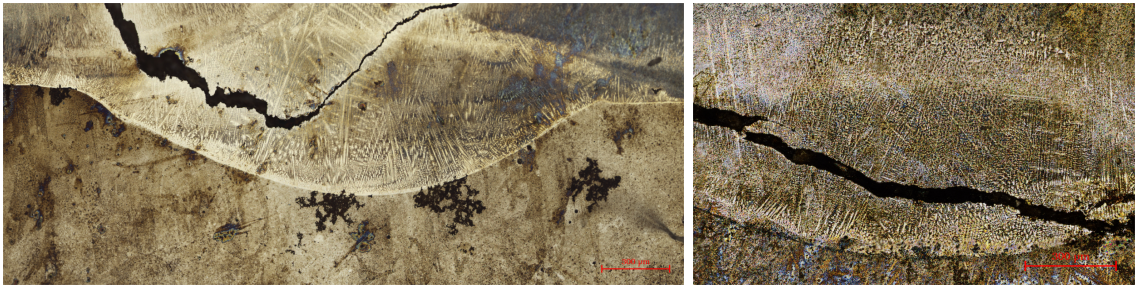
Obrázek 4.9: Závislost tvrdosti podle Vickerse na teplotě přehřevu pro tři různé kovové prášky.

Z grafu (obr. 4.9) je také zřejmé zlepšení tvrdosti povrchu vzhledem k původnímu materiálu pro všechny tři prášky. A protože 300 °C nedokáže změnit strukturu substrátu, je i jeho tvrdost napříč přehřevy zachována.

4.2.3 Mikrostruktura

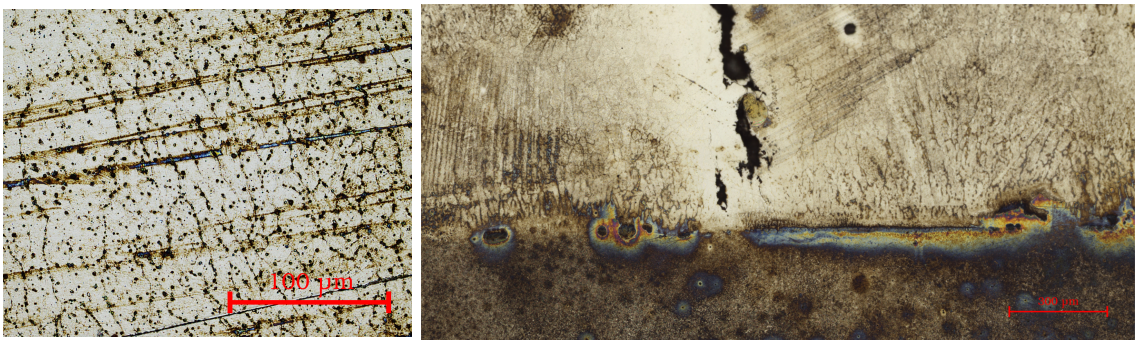
Konfokálním mikroskopem byly pořízeny také mikrofotografie struktur. V případě obou Leduritů se objevovaly jasné dendrity v oblasti promísení se substrátem (obr. 4.10).

Zbytek povrchu byl naleptaný slabě, proto nešly pozorovat struktury - pouze hranice housenek.

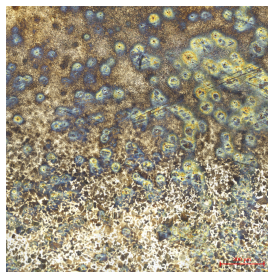


Obrázek 4.10: Mikrofotografie Leduritu 60 při předehřevu t_2 (vlevo) a t_3 (vpravo) v oblasti, kde došlo k promísení prášku se substrátem. Na snímcích jsou jasné dendritické struktury (s primárním i sekundárním větvením) ve směru teplotního gradientu. Struktury mají vyšší hustotu u návaru s vyšším předehřevem, kde jsou také dendrity jemnější. Červené škály jsou rovny $300 \mu m$.

Metco 42C šlo naleptat snáze po celé ploše řezu, na kterém byla patrná feritická struktura s tmavý perlitem (obr. 4.11 vlevo). V oblasti, kde se prášek mísil se substrátem, tavenina krystalizovala ve směru teplotního gradientu (obr. 4.11 vpravo), avšak ne tak výraznými strukturami jako Ledurit.



Obrázek 4.11: Mikrofotografie prášku Metco 42C při předehřevu t_1 (vlevo) a t_2 (vpravo).



Obrázek 4.12: Mikrofotografie substrátu - dole je neovlivněná oblast, nahoře tepelně ovlivněná oblast, červená škála je rovna $300 \mu m$.

Struktura substrátu (obr. 4.12) vlivem tepla také došla změny. Získala jemnější strukturu promísením feritu a tmavšího perlitu.

4.3 Vyhodnocení

Z povrchového určování prasklin vyšla najevo závislost na teplotě. Celková délka trhlin s rostoucí teplotou předeřevu klesá. Tento závěr se nepodařilo potvrdit nebo vyvrátit druhou metodou, při níž se trhliny a pórovitost zkoumaly na řezu. Ukázalo se, že jeden řez pro jeden vzorek je nedostatečný. Při vyšším počtu řezů vzhledem k náročnosti by bylo ale vhodnější přistoupit k jinému testu, např. testu na odolnost vůči abrazi.

Dalším parametrem byla tvrdost, z jejíhož testování vyplynula nemožnost prokázat jakoukoli závislost na předeřevu alespoň pro střední oblast v řezu vzorku. V důsledku toho při použití dvou a více vrstev lze říci, že předeřev nemá vliv tvrdost od druhé vrstvy včetně. Ovšem pokud by se podařilo snížit nejistotu měření, která má pro všechny prášky široký rozsah, mohl by se objevit jistý trend, který by byl natolik významný, že by předeřev nabyl významu.

Závěr

První část práce se věnovala parametrům přetaveného povrchu v závislosti na vzdálenosti od ohniskové roviny laserového svazku. Na základě předpokladu, že vrstva by měla mít rovnoměrný povrch a dostatečnou hloubku, byla zvolena jako ideální vzdálenost ≈ 9 mm až 10 mm. Dále by se mohla vytvořit plocha celistvě přetavená nebo by se přetavila podle daného vzoru, tj. střídaly by se oblasti přetaveného a původního povrchu. Takto modifikovaná plocha plechu by měla výrazný vliv na jeho pružnost, hysterezi při ohybu apd.

Ve druhé části se pracovalo s návary ze tří kovových prášků, které se lišily svým složením. Ty byly navařeny na ocelové hranoly s různou teplotou v rozsahu 5 °C až 300 °C. Na základě testů tvrdosti podle Vickerse se nepodařilo prokázat závislost tvrdosti na předehřevu substrátu. Je možné, že přesnějšího výsledku by se dosáhlo s lépe vyleštěným a nenaleptaným povrchem. Samotný metalografický proces byl také obtížný zejména z hlediska leptání. Kvůli velmi rozdílné tvrdosti a odolnosti vůči leptadlu mezi ocelovým hranolem a Ledurity se nepodařilo dosáhnout ideálních metalografických vzorků, na jejichž základě by bylo možné identifikovat procesy napříč vrstvami. Podařilo se pouze zjistit dendritovou strukturu v promísené oblasti na hranici návaru a substrátu.

Nicméně se prokázala závislost celkové délky prasklin na předehřevu. S rostoucím předehřevem celková délka klesá. To úzce souvisí s kompaktností vrstvy. Pokud by se provedlo seříznutí horní části a plocha by byla vyleštěna, mohl by se tento trend prokázat i v menším měřítku.

Literatura

- [1] Využití laseru v průmyslu: [Plzeň ...]. Brno: Tribun EU, 2011-. Knihovnicka.cz. ISBN isbn978-80-7399-379-5.
- [2] Proces navařování prášku laserem. In: OIL & GAS JOURNAL [online]. Houston: PennWell Corporation, c2018 [cit. 2018-08-25]. Dostupné z: https://images.pennnet.com/articles/ogj/thm/th_070910ogj_sra01.jpg
- [3] Proces navařování prášku laserem. In: OIL & GAS JOURNAL [online]. Houston: PennWell Corporation, c2018 [cit. 2018-08-25]. Dostupné z: https://images.pennnet.com/articles/ogj/thm/th_070910ogj_sra02.jpg
- [4] SCHNEIDER, Marcel. LASER CLADDING WITH POWDER. Enschede, 1998. ISBN 90 365 1098 8. Ph.D. Thesis. University of Twente, Enschede.
- [5] BOČEK, Jakub. Náhrada tvrdého chromování technologií laser cladding. Plzeň, 2015. Bakalářská. Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta strijní, Katedra materiálu a strojírenské metalurgie.
- [6] Schéma navařování prášku laserem. In: Laserline: Laser Cladding [online]. Mülheim-Kärlich: Laserline, c2018 [cit. 2018-08-25]. Dostupné z: https://www.laserline.de/fileadmin/_processed_/2/5/csm_Laserline_Auftrag_schweissen_3e61f9d8fe.png
- [7] ZHAO, Jianhua, Aibin MA, Xiulin JI, Jinghua JIANG a Yayun BAO. Slurry Erosion Behavior of AlxCoCrFeNiTi0.5 High-Entropy Alloy Coatings Fabricated by Laser Cladding. *Metals*. 2018, 8(2), 126-. DOI: 10.3390/met8020126. ISSN 2075-4701. Dostupné také z: <http://www.mdpi.com/2075-4701/8/2/126>
- [8] ŠEBESTOVÁ, Hana. Vybrané aspekty laserového svařování. Olomouc, 2012. Diplomová práce. Univerzita Palackého v Olomouci, Přírodovědecká fakulta, Katedra experimentální fyziky, Společná laboratoř optiky Univerzity Palackého a Fyzikálního ústavu Akademie věd České republiky.
- [9] DAGNALL, H. Exploring surface texture. 7th edition. Leicester: Rank Taylor Hobson, 1980. ISBN 09-019-2003-7.
- [10] ASM INTERNATIONAL. Hardness Testing. 2. ed., ASM International, 1999. ISBN 0-87170-640-7.
- [11] Zkouška tvrdosti podle Vickerse [on-line]. Wikipedia, Otevřená encyklopedie, cit. 14. 8. 2018. <https://cs.wikipedia.org/wiki/Zkou%C5%A1ka_tvrdosti_podle_Vickerse#/media/File:VickersSkizze.jpg>

- [12] ELIÁŠOVÁ, Kristina. Měření tvrdosti kovů. Zlín, 2011. Bakalářská práce. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, Fakulta technologická.
- [13] VRBOVÁ, Miroslava, Helena JELÍNKOVÁ a Petr GAVRILOV. Úvod do laserové techniky. Dot. 1. vyd. Praha: České vysoké učení technické, 1998. ISBN 80-01-01108-9.
- [14] BRAMFITT, B. L. a Arlan O. BENSCOTER. Metallographer's guide: practice and procedures for irons and steels. Materials Park, OH: ASM International, 2001. ISBN 0871707489.
- [15] ŠUPÍK, Jan. Laserové přetavování povrchu. Olomouc, 2013. Bakalářská práce. Univerzita Palackého v Olomouci, Přírodovědecká fakulta, Katedra experimentální fyziky. Vedoucí práce RNDr. Hana Chmelíčková.