

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
**FAKULTA STROJNÍ**

Studijní program: B2301 Strojní inženýrství  
Studijní zaměření: Materiálové inženýrství a strojírenská metalurgie

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

Lokální mechanické vlastnosti laserově modifikovaných žárových  
nástržků

Autor: **Stanislav RYBÁŘ**

Vedoucí práce: **Doc. Ing. Olga Bláhová, Ph.D.**

Akademický rok 2015/2016

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Stanislav RYBÁŘ**  
Osobní číslo: **S15B0178K**  
Studijní program: **B2301 Strojní inženýrství**  
Studijní obor: **Materiálové inženýrství a strojírenská metalurgie**  
Název tématu: **Lokální mechanické vlastnosti laserově modifikovaných žárových nástřiků**  
Zadávající katedra: **Katedra materiálu a strojírenské metalurgie**

### Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Nástřiky vytvářené metodou HVOF
2. Využití laseru pro modifikaci vlastností žárových nástřiků
3. Měření lokálních mechanických vlastností na dodaných vzorcích
4. Diskuse výsledků
5. Závěr

Rozsah grafických prací: fotodokumentace, obrázky

Rozsah kvalifikační práce: 50-60 stran

Forma zpracování bakalářské práce: tištěná/elektronická

Seznam odborné literatury:

- Pawlowski, L.: The Science and Engineering of Thermal Spray Coatings. John Wiley & Sons, Chichester 1995
- Burakowski, T.; Wierzchoń, T.: Surface Engineering. Boca Raton 1999
- Enžl, R.: Vysokorychlostní nástřík povlaků na bázi karbidu wolframu. Disertační práce ZČU v Plzni, 2001
- Houdková, Š.; Enžl, R.; Bláhová, O.: Žárové nástříky - moderní technologie povrchových úprav. Multimediální učebnice - CD. Plzeň 2003
- Houdková - Šimůnková, Š.; Zahálka, F.; Kašparová, M.; Bláhová, O.: Nanoindentační měření HVOF stříkaných povlaků. Chemické Listy, 2011, roč. 105, č. 5, s. 182-186
- Houdková, Š.; Smazalová, E.; Bláhová, O.; Vostřák, M.: Mechanical Properties of HVOF Sprayed, Flame and Laser Remelted NiCrBSi Coatings. In Key Engineering Materials. Stafa-Zurich: Trans Tech Publications LTD, 2014. s. 179-182

Vedoucí bakalářské práce: **Doc. Ing. Olga Bláhová, Ph.D.**

Nové technologie - výzkumné centrum

Konzultant bakalářské práce: **Ing. Šárka Houdková - Šimůnková, Ph.D.**

Nové technologie - výzkumné centrum

Datum zadání bakalářské práce: **21. září 2015**

Termín odevzdání bakalářské práce: **20. května 2016**



Doc. Ing. Milan Edl, Ph.D.  
děkan



Doc. Dr. Ing. Antonín Kříž  
vedoucí katedry

V Plzni dne 21. září 2015

## **Prohlášení o autorství**

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě bakalářskou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě strojní Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu, který je součástí této bakalářské práce.

V Plzni dne: .....

.....  
podpis autora

# ANOTAČNÍ LIST DIPLOMOVÉ (BAKALÁŘSKÉ) PRÁCE

<b>AUTOR</b>	Příjmení Rybář	Jméno Stanislav		
<b>STUDIJNÍ OBOR</b>	2301R016 „Materiálové inženýrství a strojírenská metalurgie“			
<b>VEDOUcí PRÁCE</b>	Příjmení (včetně titulů) Doc. Ing. Bláhová, Ph.D.	Jméno Olga		
<b>PRACOVISŤE</b>	ZČU - FST - KMM			
<b>DRUH PRÁCE</b>	<b>DIPLOMOVÁ</b>	<b>BAKALÁŘSKÁ</b>	Nehodící se škrtněte	
<b>NÁZEV PRÁCE</b>	Lokální mechanické vlastnosti laserově modifikovaných žárových nástřiků			

<b>FAKULTA</b>	strojní	<b>KATEDRA</b>	KMM	<b>ROK ODEVZD.</b>	2016
----------------	---------	----------------	-----	--------------------	------

## POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

<b>CELKEM</b>	43	<b>TEXTOVÁ ČÁST</b>	43	<b>GRAFICKÁ ČÁST</b>	0
---------------	----	---------------------	----	----------------------	---

<p style="text-align: center;"><b>STRUČNÝ POPIS (MAX 10 ŘÁDEK)</b></p> <p><b>ZAMĚŘENÍ, TÉMA, CÍL POZNATKY A PŘÍNOSY</b></p>	<p>Tato bakalářská práce se zabývá porovnáním lokálních mechanických vlastností laserově modifikovaných žárových nástřiků s využitím nanoindentčních zkoušek. Žárové nástřiky jsou připraveny metodou HVOF. Zkušební vzorky jsou hodnoceny z hlediska tvrdosti, indentačního modulu pružnosti, tloušťky vrstvy a mikrostruktury.</p>
<p style="text-align: center;"><b>KLÍČOVÁ SLOVA</b></p> <p style="text-align: center;"><b>ZPRAVIDLA JEDNOSLOVNÉ POJMY, KTERÉ VYSTIHUJÍ PODSTATU PRÁCE</b></p>	<p>LASER, HVOF, lokální mechanické vlastnosti, nanoindentace, tvrdost, indentační modul pružnosti</p>

## SUMMARY OF DIPLOMA (BACHELOR) SHEET

<b>AUTHOR</b>	Surname Rybář	Name Stanislav	
<b>FIELD OF STUDY</b>	2301R016 “Materials Engineering and Engineering Metallurgy“		
<b>SUPERVISOR</b>	Surname (Inclusive of Degrees) Doc. Ing. Bláhová, Ph.D.	Name Olga	
<b>INSTITUTION</b>	ZČU - FST - KMM		
<b>TYPE OF WORK</b>	<b>DIPLOMA</b>	<b>BACHELOR</b>	Delete when not applicable
<b>TITLE OF THE WORK</b>	Local mechanical properties of laser modified sprayed coatings		

<b>FACULTY</b>	Mechanical Engineering	<b>DEPARTMENT</b>	KMM	<b>SUBMITTED IN</b>	2016
----------------	------------------------	-------------------	-----	---------------------	------

### NUMBER OF PAGES (A4 and eq. A4)

<b>TOTALLY</b>	43	<b>TEXT PART</b>	43	<b>GRAPHICAL PART</b>	0
----------------	----	------------------	----	-----------------------	---

<b>BRIEF DESCRIPTION TOPIC, GOAL, RESULTS AND CONTRIBUTIONS</b>	This bachelor thesis is focused to comparing local mechanical properties of laser modified spray coatings by nanoindentation methods. Spray coatings are prepared by HVOF. Tested samples are compared by hardness, indentation elastic modulus, coating thickness and microstructure.
<b>KEY WORDS</b>	LASER, HVOF, local mechanical properties, nanoindentation, hardness, indentation elastic modulus

## **Poděkování**

Touto cestou bych chtěl poděkovat vedoucí práce Doc. Ing. Olze Bláhové Ph.D. a konzultantce Ing. Šárce Houdkové - Šimůnkové, Ph.D. za vstřícnost při poskytování cenných rad nezbytných pro vypracování této bakalářské práce.

## Obsah

1	Úvod.....	8
2	Laser.....	9
2.1	Typy laserů .....	10
3	Využití laseru pro modifikaci povrchu .....	11
3.1	Kalení laserem .....	11
3.2	Laserové přetavení.....	13
3.3	Laserové navařování.....	14
3.3.1	Slitiny přídavného materiálu a substrátu .....	16
4	Žárové nástřiky .....	17
4.1	Metoda HVOF .....	18
5	Tvrдость .....	21
5.1	Zkoušky tvrdosti .....	21
5.2	Zkouška tvrdosti podle Vickerse .....	21
5.3	Mikrotvrдость .....	22
5.3.1	Mikrotvrдость podle Vickerse .....	22
5.3.2	Mikrotvrдость podle Knoopu .....	23
5.4	Měření mikrotvrlosti pomocí nanoindentoru.....	24
5.4.1	Faktory ovlivňující přesnost měření.....	25
6	Experimentální část.....	26
6.1	Experimentální vzorky .....	26
6.2	Experimentální zařízení .....	26
6.3	Mikrostruktura .....	27
6.4	Tloušťka nástřiku.....	28
6.5	Měření tvrdosti a indentačního modulu pružnosti.....	29
6.5.1	Vzorek s HVOF nástřikem .....	29
6.5.2	Částečně přetavený nástřik.....	32
6.5.3	Zcela přetavený nástřik.....	35
7	Diskuze výsledků .....	39
8	Závěr .....	41
9	Seznam použité literatury .....	42



## Přehled použitých zkratk a symbolů

### Seznam symbolů

A - Plocha vtisku

d - Rozměr úhlopříčky Vickersova vtisku

F - Zatěžovací síla

h - Hloubka proniknutí indentoru

HK - Tvrdost podle Knoopa

$h_{max}$  - Hloubka proniknutí indentoru při maximálním zatížení

HV - Tvrdost podle Vickerse

L - Délka úhlopříčky Knoopova vtisku

max - Maximální hodnota

min - Minimální hodnota

P - Zatěžovací síla

$P_{max}$  - Hodnota maximálního zatížení indentoru

R - Faktor elastické návratnosti

r - Zaoblení hrotu indentoru

S - Sklon počátečního úseku odlehčovací křivky

$W_e$  - Elastická práce vykonaná při indentaci

$W_p$  - Plastická práce vykonaná při indentaci

### Seznam zkratk

CSM - Continuous stiffness measurement (kontinuální měření tuhosti)

HVOF – High Velocity Oxygen Fuel

ISE - Indentation size effect (efekt velikosti vtisku)

LAPVD – Laser-Assisted Physical Vapour Deposition – Laserem asistovaná fyzikální depozice z plynné fáze

LASER – Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation – zesilování světla stimulovanou emisí záření

NTC - Nové technologie - výzkumné centrum

VZU – Výzkumný a zkušební ústav

ZČU - Západočeská univerzita

## 1 Úvod

Žárové nástřiky jsou velice rozšířené způsoby pro vytváření ochranných vrstev. Tepelným ovlivnění povrchu pomocí laserového záření dochází ke změnám lokálních mechanických vlastností v povrchové vrstvě materiálu. Využití je rozšířené napříč různými průmyslovými odvětvími pro své přínosné vlastnosti, zejména pro odolnost vůči opotřebení, vysoké teplotě a korozi. Využití žárových nástřiků se nachází v energetice, automobilovém průmyslu, v leteckém průmyslu, v těžkém strojírenství nebo sklářském průmyslu.

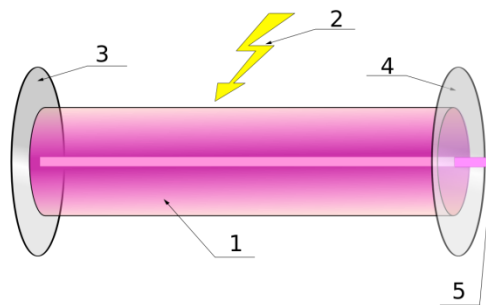
Cílem této práce je hodnocení lokálních mechanických vlastností na připravených vzorcích. Žárové nástřiky na jednotlivých vzorcích jsou připravené metodou HVOF s použitím materiálu nástřiku Stellite 6. Pro zlepšení mechanických vlastností bylo využito laserového přetavení za daných podmínek. Předmětem této práce jsou vzorky:

- s nepřetaveným nástřikem,
- s částečným přetavením žárového nástřiku
- a se zcela přetaveným nástřikem.

Mechanické vlastnosti jsou hodnoceny z hlediska tvrdosti a indentačního modulu pružnosti s využitím instrumentované metody měření tvrdosti. Nanoindentor XP je zařízení použité pro vytváření měřených hodnot. Pro hodnocení mikrostruktury a tloušťky nástřiků je využíváno světelného mikroskopu NIKON a obrazové analýzy NIS – Elements. Připravené vzorky jsou také hodnoceny z hlediska mikrostruktury a tloušťky nástřiku.

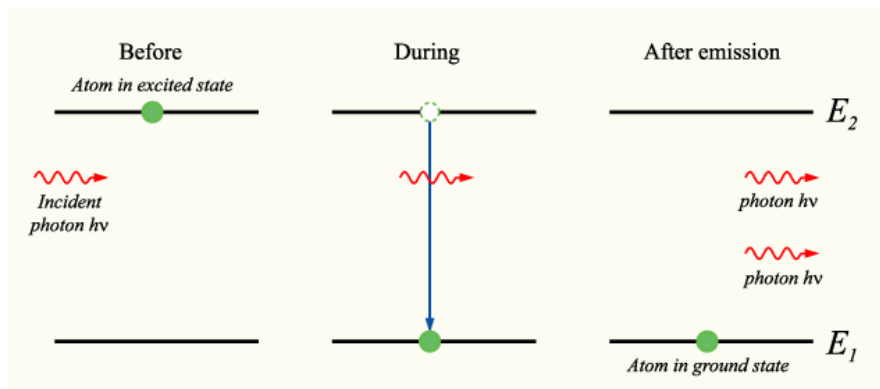
## 2 Laser

Z angličtiny lze zkratkové slovo LASER (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation) definovat jako kvantový generátor a zesilovač koherentního optického záření, které je monochromatické s nízkou rozbíhavostí fotonů a vysokou hustotou přenášeného výkonu. Všechny fotony tohoto záření se vyznačují tím, že mají stejnou vlnovou délku a frekvenci, pohyb všech fotonů se uskutečňuje ve stejném směru. LASERové zařízení může existovat v několika vlnových délkách, ty záleží především na použité technologii. Existuje velké množství laserových generátorů, ale všechny mají stejné tři základní součásti. První je laserové aktivní prostředí, ve kterém dochází k zesilování záření. Další část je zdroj čerpání pro excitaci aktivního prostředí a třetí část je rezonátor pro vytváření zpětné vazby mezi předchozími dvěma součástmi, což vede ke vzniku laserových oscilací [1].



Obr. 2.1: Konstrukce laseru (1. Aktivní prostředí, 2. Buzení aktivního prostředí, 3. Odrážné zrcadlo, 4. Polopropustné zrcadlo, 5. Laserový paprsek) [16]

Mohou nastat tři případy. Atom, který má dvě energetické hladiny a může přecházet z jedné hladiny na druhou za současného pohlcení nebo vyzáření kvanta elektromagnetického záření. Atom se nachází na horní energetické hladině. V určitém okamžiku, který není předem určený, opustí atom horní hladinu a přechází na spodní hladinu. Zároveň dochází k vyzáření kvanta energie. Tento jev se nazývá spontánní emise, viz Obr. 2.2. V dalších dvou případech dopadá na atom kvantum elektromagnetického záření. Při zastížení záření s atomem na spodní energetické hladině, může být atomem pohlceno a atom přeskočí na horní hladinu. Tento jev se nazývá absorpce. Při zastížení záření s atomem na horní hladině může dojít k donucení vyzáření dalšího kvanta energie a přechodu na spodní hladinu. Tento jev se nazývá indukovaná emise [2].



Obr. 2.2: Princip stimulované emise [17]

## 2.1 Typy laserů

Lasery lze rozdělit podle různých kritérií do několika skupin.

Podle povahy aktivního prostředí rozlišujeme lasery

- pevnolátkové (rubín, sklo, keramika)
- polovodičové
- plynové (atomární, molekulové, iontové)
- chemické
- kapalinové
- lasery využívající svazky nabitých částic

Podle způsobu čerpání energie (buzení) lze lasery rozdělit na lasery čerpané

- opticky (výbojkou, jiným laserem, slunečním světlem a radioaktivním zářením) pro pevnolátkové a kapalinové

- elektrickým výbojem (srážkami v elektrickém výboji, svazkem nabitých částic, injektáží elektronů, interakcí elektromagnetického pole se shluky nabitých částic) pro plynové
- chemicky (energií chemické vazby, fotochemickou disociací, výměnou energie mezi molekulami a atomy)
- termodynamicky – tepelnými změnami (zahřáním a ochlazením plynu)
- jadernou energií (reaktorem, jaderným výbuchem)
- rekombinací (polovodičové)
- elektronovým svazkem
- injekcí nosičů nábojů

Z hlediska režimu práce mohou lasery pracovat

- kontinuálně (spojitě, nepřetržitě)
- impulsně (dlouhé, krátké, velmi krátké)
- pulsně

Lasery můžeme dělit také podle vyzařované vlnové délky na

- infračervené
- v oblasti viditelného světla (pásma)
- ultrafialové
- rentgenové

Podle zúčastněných energetických hladin na kvantovém přechodu

- elektronové
- molekulární (rotační, rotačně – vibrační, vibrační)

Dělení podle použití na lasery

- výzkumné
- měřicí
- lékařské
- technologické
- energetické
- vojenské [2]

### 3 Využití laseru pro modifikaci povrchu

Tepelné ovlivňování povrchu pomocí laserového záření vede ke změně mikrostruktury a změně lokálních mechanických vlastností v povrchové vrstvě materiálu. Při zpevňování povrchu dochází ke zvýšení odolnosti materiálu proti opotřebení [9].

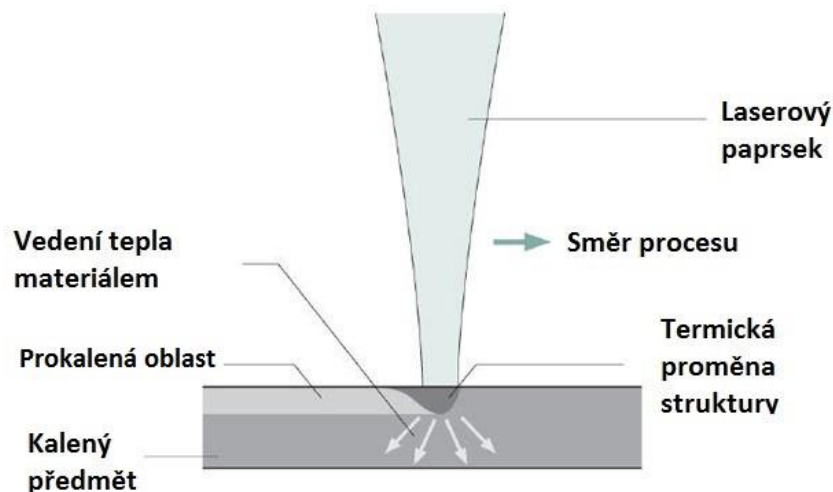
Laserové modifikace povrchu se dělí do základních pěti skupin:

- Tepelné zpracování povrchu laserem (Laser hardening)
- Laserové přetavení (Laser melting)
- Depozice materiálu s využitím laseru
  - Laserové navařování (Laser cladding)
  - Legování povrchu
  - Vstřelování nenatavených částic do laserem nataveného substrátu (Laser Melt/Particle Injection)
- Laserem asistovaná fyzikální depozice z plynné fáze (LAPVD)
- Vytvrzování povrchu materiálu rázovou vlnou pomocí laseru (Laser shock peening) [9]

Hlavní rozdíl mezi tepelným zpracováním povrchu laserem a laserovým přetavením je v tom, že při tepelném zpracování nedochází k natavení povrchu. Při metodě laserového přetavení je požadavek natavit celou vrstvičku materiálu. Depozice materiálu probíhá přidáním materiálu do roztaveného substrátu. Přídavný materiál se nemusí během procesu roztavit. Takové legování povrchu tvrdými částicemi se nazývá (laser melt/particle injection), případě slitin jde o proces laserového navařování. U metody LAPVD jde o fyzikální depozici plynné fáze v uzavřené plynné nádobě, kde se neobjevuje kapalná fáze. Depozice probíhá pomocí sublimace ohřátého deponovaného materiálu. Při metodě shock peening dochází ke vzniku šokových vln. To vede k zvýšení povrchového napětí v materiálu [9].

#### 3.1 Kalení laserem

Při tomto tepelném cyklu je povrch materiálu vystaven rychlému ohřevu a následnému ochlazení, které není uskutečněné chladícím médiem. Při tepelném zpracování oceli dochází nejdříve k austenitizaci a následnému zakalení a vzniku indukovaného martenzitu. Všechny přeměny probíhají pouze v tuhém stavu, během procesu nedochází ke vzniku kapalné fáze. Tepelným zpracováním dochází ke vzniku martenzitu, který výrazně ovlivňuje vlastnosti povrchové vrstvy materiálu. Tento proces tepelného zpracování vede ke zvýšení odolnosti povrchu materiálu proti opotřebení. Pro tento jev je metoda často využívána v automobilovém průmyslu pro výrobu vačkových hřídelů, vedení ventilů nebo pro pracovní plochy ozubených kol. Základní princip metody je zobrazen na Obr. 3.1 [10].



Obr. 3.1: Povrchové kalení laserem [18]

Tepelně ovlivněná oblast při kalení laserem je ovlivněna souborem několika faktorů. Tvrdost, mikrostruktura, zbytkové napětí a hloubka prokalení jsou ovlivněny zejména energií laserového svazku, který dopadá na povrch kaleného předmětu. Dále průměr paprsku a rychlost posuvu ovlivňují vlastnosti. Důležitý je i druh ochranného plynu, v kterém probíhá proces kalení. Samotný materiál a jeho původní mikrostruktura ovlivňují výsledné vlastnosti tepelně ovlivněné oblasti [9].

Metoda povrchového zpracování materiálu laserem se využívá i u neželezných kovů. U neželezných kovů dochází ke změně vlastností precipitačním vytvrzováním. Tvrdost může vzrůst až o 100%. Během procesu ohřívání materiálu dochází k ovlivnění pouze malého objemu materiálu. Po procesu dochází k rychlému vychladnutí z důvodu velkého teplotního gradientu. Tento proces se dělí na fázi ohřevu materiálu a fázi chladnutí materiálu (stárnutí) [9].

Hlavní výhody metody kalení povrchu laserem:

- Rychlý ohřev a ochlazení
- Malá tepelně ovlivněná oblast
- Minimální deformace materiálu
- Krátký pracovní cyklus
- Možnost automatizace
- Bez nutnosti používat ochlazovací medium
- Minimální množství výparů

Hlavní nevýhody metody kalení povrchu laserem:

- Náklady na pořízení metody
- Nutnost samokalícího efektu slitiny
- Vzhledem ke krátkému cyklu je problém u slitin vyžadující delší časový úsek pro zpracování

Využití v technické praxi:

- Drážky hřídele

- Pístní kroužky
- Nýt lamelové spojky
- Sedlo ventilů
- Části lopatkových turbín
- Části potrubí
- Vodící šrouby
- Dosedací části ložisek [10]

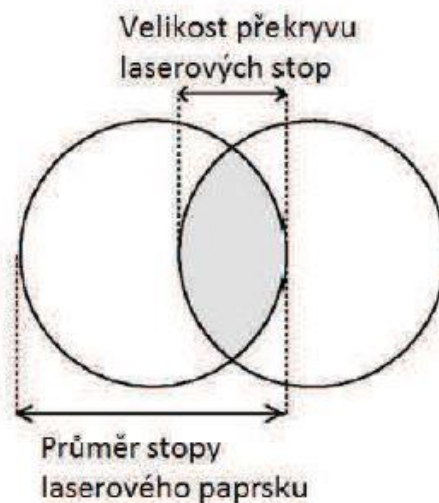
### 3.2 Laserové přetavení

Laserové přetavení se využívá u ocelí, které obsahují velké množství karbidů. Tyto oceli jsou velice těžce zpracovatelné v tuhém stavu, proto se s výhodou využívá metody, kdy dojde k jejich roztavení, rychlost difúze je vyšší [9].

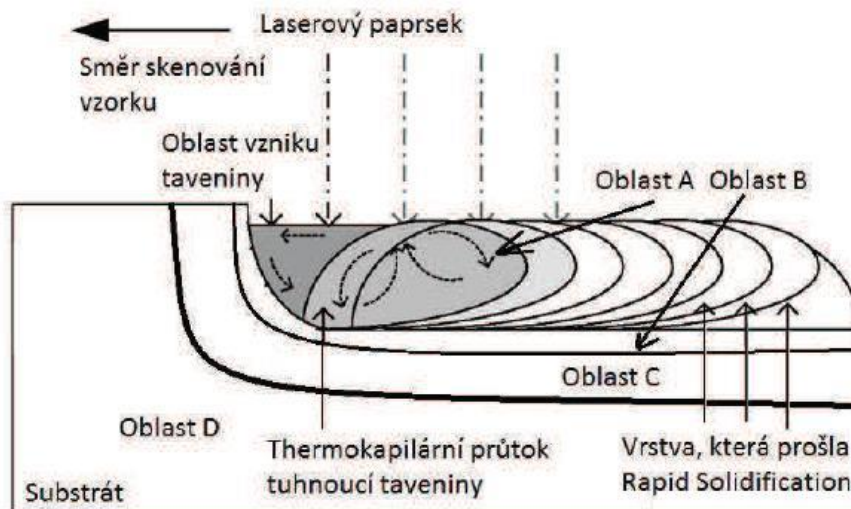
Při laserové přetavení dochází k natavení pouze malé vrstvičky materiálu. Natavená vrstvička následně přechází do tuhého stavu. Jedná se o velice rychlý proces, který se nazývá rapid solidification. Nově vzniklá mikrostruktura se vyznačuje vysokou homogenitou a velice malou velikostí zrna, svými vlastnostmi se odlišuje od svého okolí. Metoda probíhá bez přídavného materiálu. Potřebná energie je vyšší, než je energie u povrchového kalení, je nutné natavit malou vrstvičku materiálu. Změna mikrostruktury ovlivňuje vlastnosti materiálu. Dochází ke zvýšení tvrdosti povrchové vrstvy, dále se zvyšuje odolnost proti korozi a odolnosti proti opotřebení. Při procesu laserového přetavení dochází k vícenásobnému skenování povrchu, dochází k překryvu laserových stop, viz Obr. 3.3. Překryv se negativně podílí na tvrdosti, proto je důležité snížit množství překryvů na minimum. Při vyšších rychlostech skenování a nižších energiích laserového paprsku se dosahuje vyšší tvrdosti a lepší struktury. Proces laserového přetavení je zobrazena na Obr. 3.4 [9].

Příklady využití metody v průmyslu:

- Vačkový hřídel
- Pístní kroužek
- Lopatky kalového čerpadla
- Vložka spalovacího motoru [9]



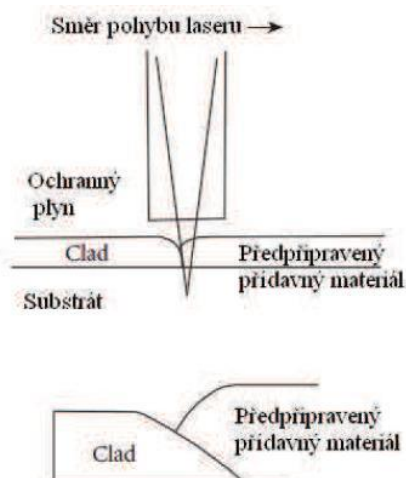
Obr. 3.3: Překryv laserových stop [20]



Obr. 3.4: Metoda laserového přetavení [20]

### 3.3 Laserové navařování

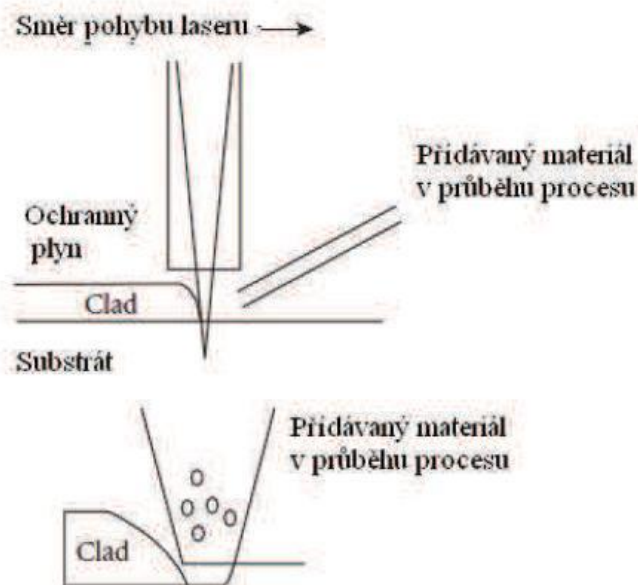
Při metodě laserového navařování (laser cladding) dochází současně k natavení malé povrchové vrstvičky substrátu a roztavení přídavného materiálu. Přidávání přídavný materiál může být prováděno až v průběhu procesu navařování nebo může být přítomný již před zpracováním. Připravený materiál může být v podobě vrstvy získané žárovým nástřikem nebo v podobě práškové směsi. Dochází k roztavení přídavného materiálu a natavení povrchové vrstvy substrátu. Natavená vrstva substrátu by měla být co nejtenčí, ale zároveň dostatečně silná, aby vznikla silná vazba a proběhlo promísění přídavného materiálu v co nejmenším objemu vrstvy. Princip této metody je zobrazen na Obr 3.5 [10].



Obr. 3.5: Předpřipravený přídavný materiál u laserového navařování [10]

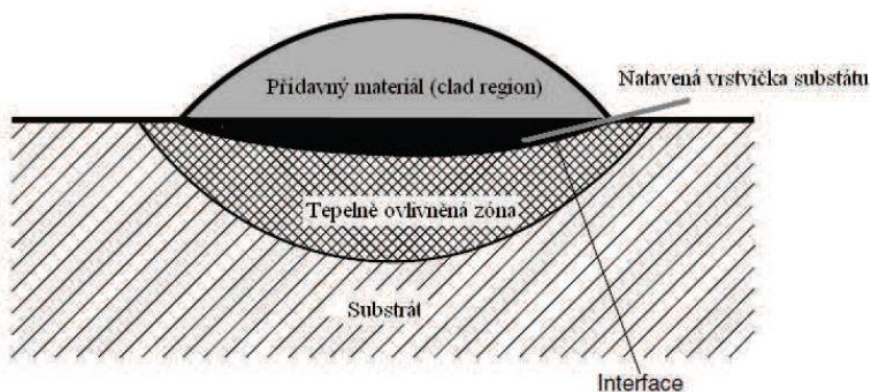


Druhý případ se nazývá Rapid solidification, kdy se přídavný materiál přivádí přímo do natavené vrstvičky substrátu v průběhu procesu. Opět je důležité, aby vzniklá vrstvička byla co nejmenší. Princip metody je zobrazen na obr 3.6 [10].



Obr. 3.6: Materiál přímo přidávaný v průběhu navařování [10]

Teplu je velmi rychle odváděno z místa povrchu do substrátu materiálu. Při tomto procesu dochází ke vzniku jemné struktury, která neobsahuje velké množství vad. Nedochozí k výraznému promísení přídavného materiálu se substrátem. Vzniklá povrchová vrstva se vyznačuje vlastnostmi přídavného materiálu. Tím je možné dosáhnout vlastností povrchu, který má lepší odolnost proti opotřebení, korozi a zvýšenou tvrdost povrchové vrstvy. Jako substrát se využívají materiály s dobrou tepelnou vodivostí, jedná se o oceli uhlíkové, manganové, korozivzdorné a slitiny na bázi hliníku, titanu, niklu, hořčíku a mědi. Při tomto procesu navařování může docházet k tvorbě trhlin, které jsou způsobené vznikem velkým tepelným pnutím. Pro snížení výskytu trhlin je důležité před procesem laserového navařování předehřívát substrát. Předehřevem se současně zlepší adheze substrátu a přídavného materiálu. Zvýšením teploty se dosahuje lepší vazba mezi substrátem a přídavným materiálem. Obr. 3.7 ukazuje oblasti vzniklé v průběhu laserového navařování [10].



Obr 3.7: Oblasti materiálu vzniklé v průběhu laserového navařování [21]

### 3.3.1 Slitiny přídavného materiálu a substrátu

Jako materiál substrátu se pro laserové navařování se často využívá manganouhlikových ocelí, korozivzdorných a nástrojových. Je důležité, aby měl materiál dostatečnou tepelnou vodivost. Musí spolehlivě odvádět teplo z místa povrchu do těla součásti. Současně nesmí docházet k přílišnému stupni promísení substrátu a přídavného materiálu, což by vedlo ke vzniku křehkých fází. Vzhledem k tvaru součásti je nutné zachovat co nejnížší počet přejezdu laserovou hlavicí, aby nedocházelo k výraznému překryvu laserových stop. Pro získání vhodných výsledných vlastností, musí být před samotnou operací laserového navařování povrch vhodně očištěn, odmaštěn a mořen [10].

Přídavný materiál se používá takový, u kterého je schopnost absorpce laserového vlnění na takové úrovni, aby nedošlo ke vzniku taveniny, a zároveň se nesmí ve velké míře odpařovat. Přídavné materiály musí vyznačovat dobrou tepelnou vodivost pro přenos tepla do substrátu. Jinak vedou k tvorbě trhlin ve vrstvě. Složení slitiny musí být takové, aby společně se substrátem vytvořila dostatečnou metalurgickou vazbu. Metoda laserového navařování je vhodná pro kombinaci dvou kovových slitin. Kombinace keramických substrátů a kovových přídavných materiálu, je problém, protože se jedná o dva materiály s odlišnými vlastnostmi [10].

Rozdělení nejpoužívanějších přídavných materiálů:

- Kobaltové slitiny
- Slitiny na bázi železa
- Niklové slitiny
- Karbidy wolframu, titanu a křemíku [10]

V technické praxi jsou velice rozšířeně využívány kobaltové slitiny na bázi Stellite. Využívají se pro operace, kdy je pracovní teplota do 500 °C. Je také možnost navařovat vrstvy z niklových superslitin na ekonomicky dostupnější materiály substrátu.

Příklady využití z technické praxe

- Lopatky turbín
- Obráběcí nože
- Pouzdra čerpadel
- Válce
- Vrtací tyče [10]

Hlavní výhody metody navařování:

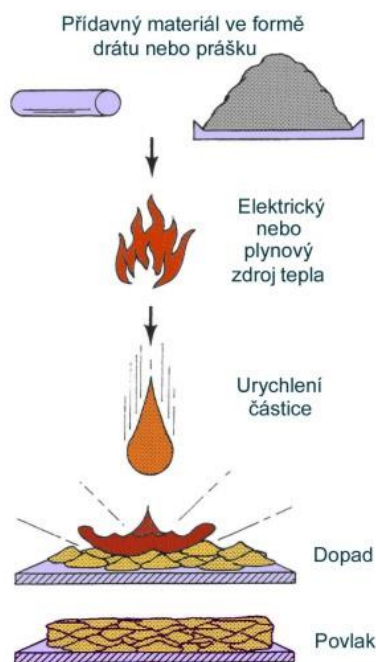
- Malé množství přivedené tepelné energie způsobuje malou tepelně ovlivněnou oblast.
- Kvalitní depozit s minimální pórovitostí
- Malé množství odpařeného přídavného materiálu
- Možnost tvorby vrstev na velice malé části povrchu
- Minimální zředění přídavného materiálu se substrátem (<2%) [9]

Hlavní nevýhody metody navařování:

- Vysoké pořizovací náklady
- Metoda není vhodná, pokud je oblast zvýšení tvrdosti relativně malá [9].

## 4 Žárové nástřiky

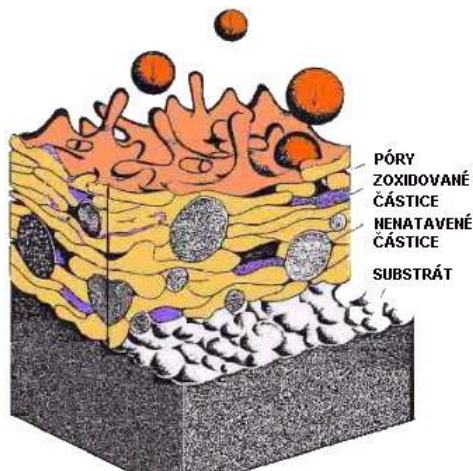
Žárový nástřik lze charakterizovat jako částicový proces, při kterém dochází k vytváření povlaků na povrchu substrátu. Tloušťka žárového nástřiku je zpravidla větší než 50  $\mu\text{m}$ . Přídavný materiál je ve formě prášku nebo drátu přiveden do zařízení, kde dochází k jeho natavení. Kinetickou silou materiálů či rychlostí média dojde k výraznému rozprostření na povrchu substrátu. Natavené částice rychle přechází do tuhého stavu a tvoří povlak s lamelární strukturou. Princip vytváření žárových nástřiků je zobrazen na Obr. 4.1. Žárové nástřiky je možné vytvářet na téměř všech typech materiálů substrátu. Žárové nástřiky je také možné vytvářet ze široké škály různých materiálů. Jedná se o kovy a jejich slitiny, tak i různé druhy keramik. Celé natavené nebo částečně natavené kapky materiálu dopadají na povrch, kde mechanicky kotví na zdrsňeném povrchu substrátu [11].



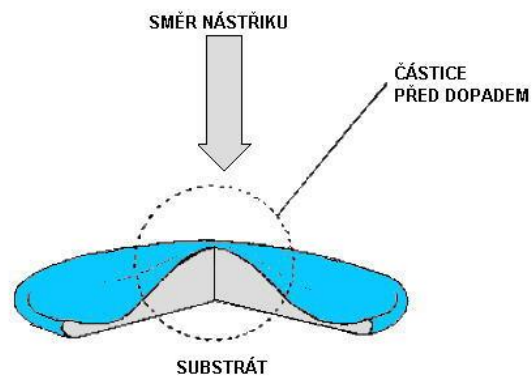
Obr. 4.1: Princip vytváření žárových nástřiků [11]

Na Obr. 4.2 je vidět lamelární struktura žárového nástřiku. Struktura je tvořena jednotlivými deformovanými částicemi, které se nazývají splaty. Splat má tvar disku, viz Obr 4.2. Ve struktuře je možný výskyt částečně natavených nebo nenatavených částic přídavného materiálu, pórů a oxidických částic. Oxidické částice se nejčastěji vyskytují jako podlouhlé tmavé útvary. Vznikají buď vlivem vysoké teploty na povrchu povlaku, nebo interakcí atmosféry s horkou letící částicí. Přítomnost oxidických částic ve struktuře nástřiku zvyšuje tvrdost a křehkost. Při vyšší lokální koncentraci oxidů může docházet ke snížení kohezní pevnosti povlaku. Kvalita povrchu je také ovlivněna mírou porózy. Poróza je ovlivněna rychlostí dopadu jednotlivých částic. Kinetická energie natavené částice je při dopadu na povrch přeměněna na deformační práci. Zcela natavené částice při dopadu na povrch vyplňují nerovnosti a póry a stávají se součástí povlaku. Částice částečně natavené nebo nenatavené se dopadem na povrch plasticky deformují. S vyšší kinetickou energií je rozprostření částic zlepšuje, snižuje se míra porózy a zvyšuje se kohezní pevnost. V případě vysoké porózy je povlak náchylnější na praskání a odlupování. Teplota a rychlost jsou nejdůležitějšími parametry, které přímo ovlivňují kvalitu samotného procesu žárových

nástříků. Výsledné teploty a rychlosti částic jsou ovlivněné použitým zdrojem tepelné energie, konstrukce a nastavení procesních parametrů [11].



Obr 4.2: Struktura žárového nástříku [11]



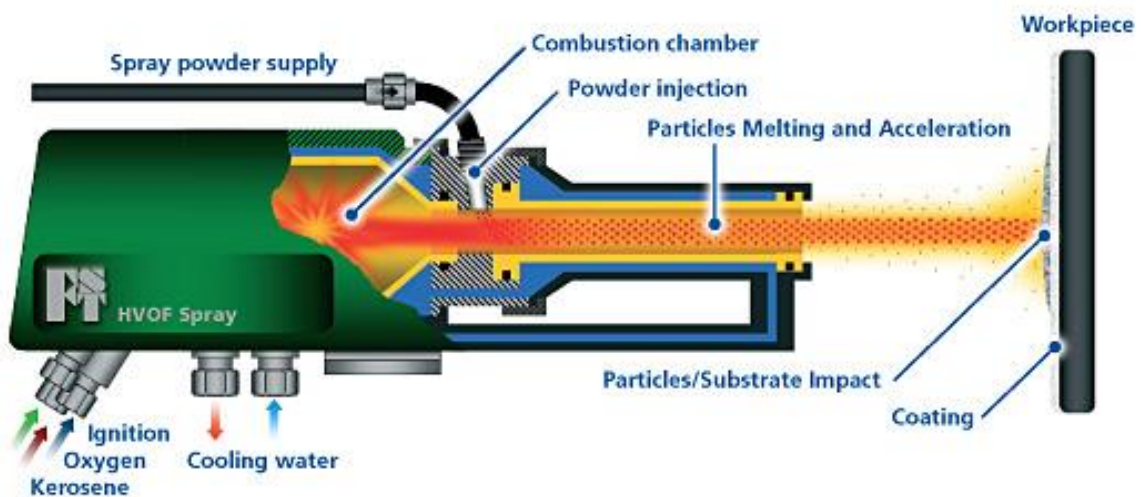
Obr. 4.3: Vznik splatu [11]

Vlastnosti žárových nástříků jsou ovlivněny různými faktory. Výsledné chování povlaků je ovlivněno použitým materiálem, mírou poróznosti, množstvím oxidických vměstků a další nehomogenity vyskytující se v povlaku. Vlastnosti ovlivňují také kohezní a adhezní pevnost. Nejčastěji se u žárových nástříků hodnotí adhezní pevnost nástříku k substrátu, kohezní pevnost povlaku, tvrdost, odolnost vůči korozi, tepelné nebo elektrické vlastnosti a obrobiteľnosť [11].

Metody žárových nástříků se rozdělují do dvou skupin podle typu tepelného zdroje použitého pro nastavení přídavného materiálu. Do první skupiny spadají metody, kdy je tepelná energie získávána hořením směsi paliva a kyslíku. Jedná se o metody nástříku plamenem, detonační nástřík a vysokorychlostní nástřík HVOF. Do druhé skupiny patří metody, které získávají tepelnou energii z elektrického zdroje. Patří sem metoda plazmatického nástříku a nástřík elektrickým obloukem [11].

#### 4.1 Metoda HVOF

Na Obr. 4.4 je vidět princip metody HVOF (High Velocity Oxygen Fuel). Metoda je založená na spalování směsi kyslíku a kerosinu. Do spalovací komory jsou odděleně přiváděny kyslík a kerosin, ve spalovací komoře dochází k jejich atomizaci. Zažehnutí nastává pomocí jiskry a produkty spalování jsou urychlovány konvergentně divergentní tryskou až na supersonické hodnoty. Tlak ve spalovací komoře je monitorován pro zajištění stabilních podmínek hoření. Hořák dosahuje vysoké teploty a musí být chlazen. Chlazení zajišťuje voda, která proudí v meziplášti hořáku. Urychlené spaliny dosahují nadzvukových výstupních rychlostí. Přiváděný materiál ve formě prášku je za pomoci nosného dusíku přiváděn radiálně do difuzoru. Zde dochází k jeho natavení a přes trysku pak k urychlení směrem k povlakované součásti. V proudu spalin probíhají termodynamické děje, vznikají kompresní a expanzní vlny [11].



Obr 4.2: Schéma metody HVOF [11]

Natavené částice přídavného materiálu svou vysokou rychlostí zaručují dokonalé rozprostření a ukotvení k substrátu. Vznikají nástřiky s vysokou hustotou a vysokou mírou adheze. V porovnání s metodou plazmatu je teplota plamene výrazně nižší. Teplota plamene se u metody HVOF pohybuje okolo 5500 K, u plazmatického nástřiku je teplota plamene před 10 000 K. Tato technologie není vhodná pro keramické nástřiky, protože nedochází k dostatečnému natavení a následnému rozprostření na povrchu substrátu. Vhodné materiály pro tvorbu povlaků jsou kovy a jejich slitiny. Pro nástřik se využívají cermety, často na bázi karbidů wolframu, titanu a chromu. Nižší teplota zamezuje tvorbě oxidaci a vyhořívání prvků přídavného materiálu. Metoda je vhodná pro tvorbu povlaků s velkou tloušťkou, vznikají povlaky s tlakovým pnutím. Tlakové pnutí příznivě ovlivňuje únavové vlastnosti povlakovaných součástí. Na obr 4.3 je vidět nástřik pomocí metody HVOF [11].



Obr. 4.3: Nástřik HVOF [15]

Metoda žárově stříkaných povlaků se uplatnila ve velké řadě různých odvětví. Aplikace žárových nástřiků s sebou přináší zvýšení provozních schopností povlakovaných



komponent zvláště v specifických provozních podmínkách. Metoda žárově stříkaných povlaků se uplatňuje v různých odvětvích:

- Energetika: Zde se využívají povlaky odolné proti korozi, erozi a mechanickému opotřebení. Povlaky se nejčastěji aplikují na oběžné lopatky, výměníky tepla, čerpadla a ventilátory.
- Automobilový průmysl: Zde se povlaky nejčastěji aplikují na díly, kde je výskyt vysoké teploty nebo díly, kde je potřeba zajistit odolnost proti opotřebení. Jedná se o díly spalovacího motoru (písty, viz Obr. 4.4, hlava, ventily), čepy a vačky.
- Všeobecné strojírenství: Zde je využití pro povlaky odolné proti opotřebení, korozi a mechanickému opotřebení.
- Letecký průmysl: V leteckém průmyslu je využití pro díly vystavené působení vysokých teplot. Využití nachází pro díly leteckých motorů.
- Těžké strojírenství: Otěruvzdorné a tvrdé povlaky. Využívají se pro plochy pohybových součástí.
- Sklářský průmysl: Využití nachází pro pracovní plochy sklářských forem vystavených abrazivnímu a tepelnému namáhání.
- Renovace: Renovují se opotřebené funkční plochy součástí. Typickými příklady jsou ložiska, čepy válců a pístnice [11].



Obr. 4.4: Píst spalovacího motoru [19]

## 5 Tvrдост

### 5.1 Zkoušky tvrdosti

Jedná se o velice rozšířené zkoušení materiálu, hlavní předností zkoušek je jednoduchost a rychlost. V mnoha případech není nutné zhotovovat zvláštní zkušební tělesa, lze měřit tvrdost přímo na výrobku, aniž by došlo k narušení mechanických vlastností. Tvrдост je mechanická vlastnost materiálů, je definována jako odolnost povrchu proti místní deformaci, kterou způsobuje zatěžované těleso přesných geometrických tvarů. Tvrдост nelze stanovit jako fyzikální veličinu, zjištěná hodnota je pouhým srovnávacím číslem. Po provedení vtisku je napětí rozděleno nerovnoměrně, proto výpočet nemá fyzikální význam.

Zkoušky tvrdosti se dělí podle více hledisek. Podle principu se rozdělují na zkoušky vrypové, vnikací, nárazové a odrazové. Podle rychlosti zatěžující síly se dělí na zkoušky statické nebo dynamické. A podle účelu měření se dělí na zkoušky makrotvrдостi a mikrotvrдостi. V poslední době je stále častěji uplatňována metoda měření nanotvrдостi.

Dynamické zkoušky se vyvozují rázem, jejich výsledky mají nižší přesnost než zkoušky statické. Zkoušky jsou buď plastické, kdy se tvrdost určuje z velikosti trvalého vtisku, nebo zkoušky elastické, kde se tvrdost určuje z pružných vlastností materiálu.

Statické zkoušky jsou charakteristické tím, že zátěžná síla je klidná, plynule rostoucí. Při zkoušce dojde k vytvoření trvalého vtisku nebo vrypu na povrchu zkoušeného materiálu. Velikost porušení udává odolnost materiálu vůči vniknutí cizího tělesa. Vnikací těleso musí mít co nejvyšší tvrdost a mez pružnosti, aby odolávalo plastickým deformacím. Jako materiál vnikacího tělesa se využívá kalené oceli, slinutého karbidu nebo diamantu.

Velikost sil, jimiž jsou jednotlivé atomy kovu navzájem vázány, ukazují na odolnost proti vniknutí vnikacího tělesa do zkoušeného materiálu. Při měření téhož materiálu může nastat odlišnost naměřených hodnot tvrdosti v různých místech měřeného vzorku. Tuto skutečnost ovlivňuje řada faktorů:

Velikost zrna: Jemnozrnné materiály mají obecně vyšší tvrdost než materiály hrubozrnné. Jemnější krystalizace obsahuje v jednotce objemu více hranic zrn, které odolávají vniknutí cizího tělesa více, než odolává střed zrna.

Teplota: S vyšší teplotou se vazby mezi atomy stávají vlivem roztažnosti méně pevné a materiál se jeví měkčí.

Cizí příměsi: V materiálu snižují jeho plasticitu, tím zvyšují jeho tvrdost.

Vnitřní pnutí: Jsou nejčastěji způsobena tvářením za studena, způsobují zvýšení tvrdosti [4].

### 5.2 Zkouška tvrdosti podle Vickerse

Podstata zkoušky spočívá ve vtláčování indentoru do zkoušeného materiálu a následnému měření velikosti vtisku. Jako indentor se místo kuličky využívá pravidelného čtyřbokého diamantového jehlanu s vrcholovým úhlem mezi protilehlými stěnami  $136^\circ$ , viz Obr. 5.1. Tvrдост se označuje HV a je vyjádřena jako poměr zatížení  $F$  k ploše vtisku  $A$ , který se uvažuje jako čtyřboký jehlan se čtvercovou základnou o úhlopříčkách  $d_1$  a  $d_2$ . Za normálních podmínek se zatěžuje vzorek silou  $F = 294 \text{ N}$  po dobu  $10 - 15 \text{ s}$ , jiné parametry měření se volí s ohledem na zkoušený materiál. Měření úhlopříček se provádí pomocí

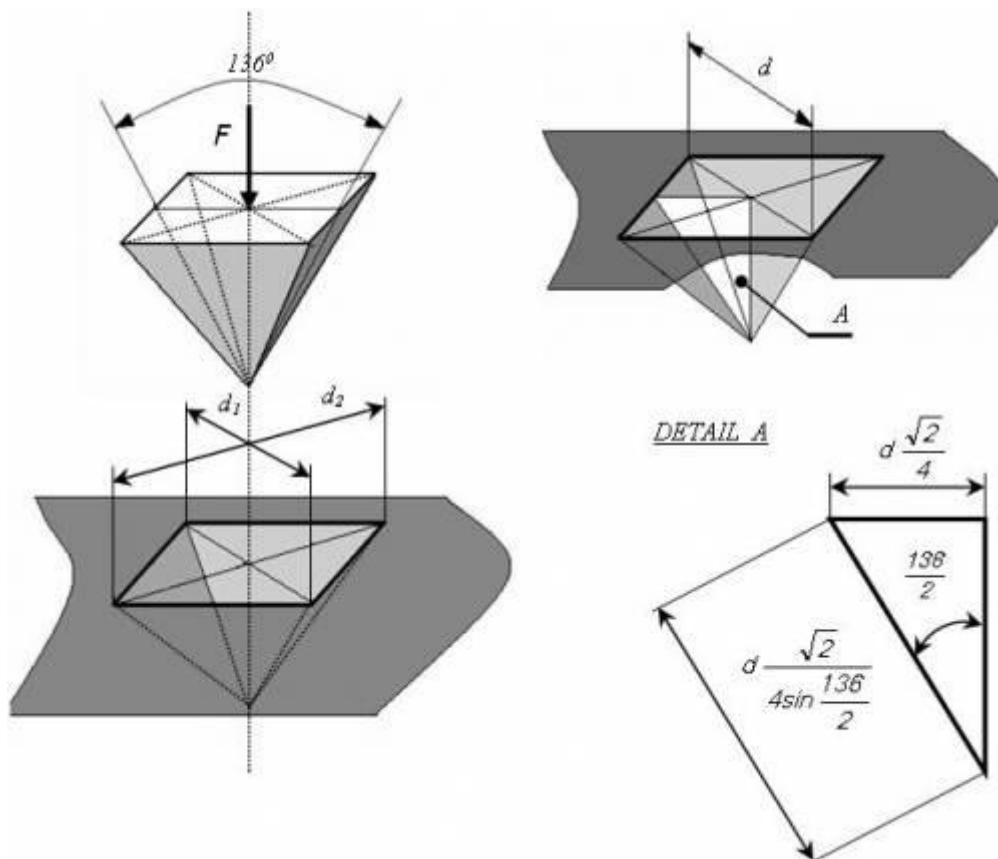
mikroskopu a pro výpočet tvrdosti se uvažuje jejich aritmetický průměr. Vzdálenost mezi vtisky nebo od kraje vzorku musí být minimálně  $2,5 \cdot d$ .

Výpočet tvrdosti podle Vickerse:

$$HV = \frac{0,189 \cdot F}{d^2}$$

F [N] ... zatěžovací síla

d [mm] ... střední vzdálenost úhlopříček [7]



Obr. 5.1: Princip zkoušky tvrdosti podle Vickerse [12]

### 5.3 Mikrotvrlost

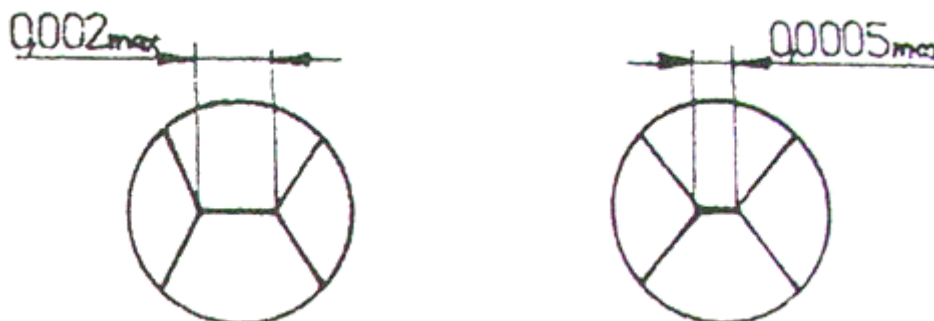
Při měření mikrotvrlosti se využívá nižších zatěžujících sil, které zpravidla nepřekračují 5 N, vznikají nepatrné vtisky, z kterých se pomocí vhodně zvolených zařízení vyhodnocují hodnoty mikrotvrlosti, které dosahují vyšších hodnot než je tomu u měření makrotvrlosti. Při odlehčení indentoru dochází k zmenšení vtisku o elastickou deformaci, jejíž podíl na celkové velikosti vtisku se zvětšuje s klesající jeho velikostí. Zkoušky mikrotvrlosti jsou výhodné pro měření tvrdostí různých fází u vícefázové slitiny. Také slouží k určování rozdílu tvrdostí hranic a vnitřku zrn [4].

#### 5.3.1 Mikrotvrlost podle Vickerse

Při zkoušce mikrotvrlosti podle Vickerse se využívá leštěného diamantového pravidelného čtyřbokého jehlanu s vrcholovým úhlem  $136^\circ$  mezi protilehlými stěnami. Na



obr. 5.2 je vidět porovnání hrotů vnikacího tělesa u mikrotvrdomosti a makrotvrdomosti. Délka společné hrany mezi protilehlými stěnami jehlanu nesmí přesahovat 0,0005 mm. Hodnota mikrotvrdomosti je vyjádřena jako podíl zatížení indentoru a plochy vtisku [4].



Obr. 5.2: Hrot vnikacího tělesa u zkoušek a) mikrotvrdomosti, b) makrotvrdomosti [4]

Mikrotvrdomost se značí HV a určí se ze vztahu:

$$HV = 0,189 \frac{F}{d^2}$$

F [N] ... zatěžovací síla

d [mm] ... průměrná hodnota úhlopříčky [4]

### 5.3.2 Mikrotvrdomost podle Knoopa

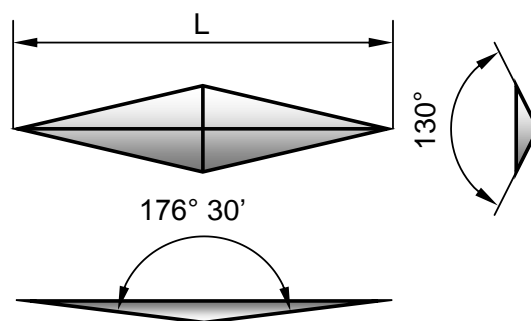
Měřením mikrotvrdomosti podle Knoopa se získávají vtisky tvaru kosočtverce s poměrem úhlopříček 1 : 7, jak je vidět na Obr. 5.3. Měří se delší úhlopříčka vtisku L. Metoda využívá diamantový jehlan s úhly protilehlých stran  $\alpha = 130^\circ$  a  $\beta = 172^\circ 30'$ . Indentor proniká do menších hloubek než u metody podle Vickerse [8].

Mikrotvrdomost podle Knoopa se značí HK a stanoví se ze vztahu:

$$HK = 1,451 \frac{F}{L^2}$$

F [N] ... zatěžující síla

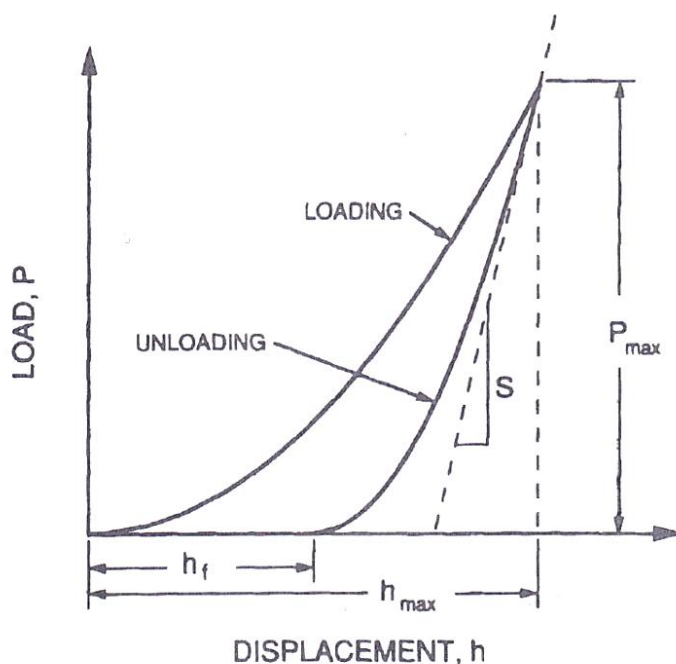
L [mm] ... vzdálenost delší úhlopříčky [8]



Obr. 5.3: Vtisk provedený metodou podle Knoopa [14]

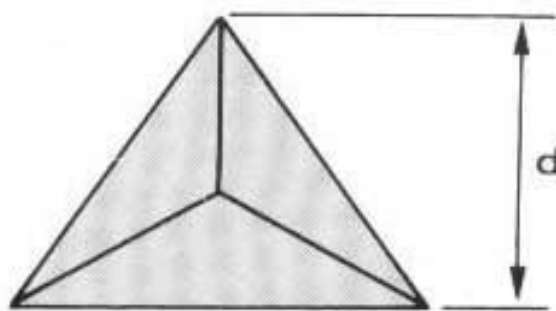
## 5.4 Měření mikrotvrlosti pomocí nanoindentoru

Měření mikrotvrlosti při velmi nízkých zatíženích se provádí pomocí nanoindentoru. Přístroj měří proniknutí hloubky indentoru v průběhu zatěžování i odlehčování. Do grafu se zaznamenává závislost hloubky proniknutí indentoru na velikosti zatížení. Na Obr. 5.4 je vidět jeden z příkladů indentační křivky, která je složená ze zatěžovací a odlehčovací křivky. Pro graf je charakteristickou hodnotou velikost maximálního zatížení  $P_{max}$ , kterému odpovídá hloubka maximálního proniknutí indentoru  $h_{max}$ . Po odlehčení zůstává ve vzorku trvalý vtisk, jehož velikost je určena  $h_f$ . Hodnota  $S$  udává sklon počátečního úseku odlehčovací křivky. Hodnoty nanotvrlosti se vypočítají z naměřených hodnot, dále se určuje i podíl elastické  $W_e$  a plastické  $W_p$  deformace během zatěžovacího cyklu. Tento podíl vyjadřuje faktor elastické návratnosti  $R = W_e / W_p$  [6,7].



Obr. 5.4: Nanoindentační křivka [13]

Pro nanoindentační hodnocení materiálu se využívá také Berkovičův indentor. Průmět Berkovičova vtisku se jeví jako trojúhelník, viz Obr. 5.5.



Obr. 5.5: Tvar Berkovičova vtisku [3]

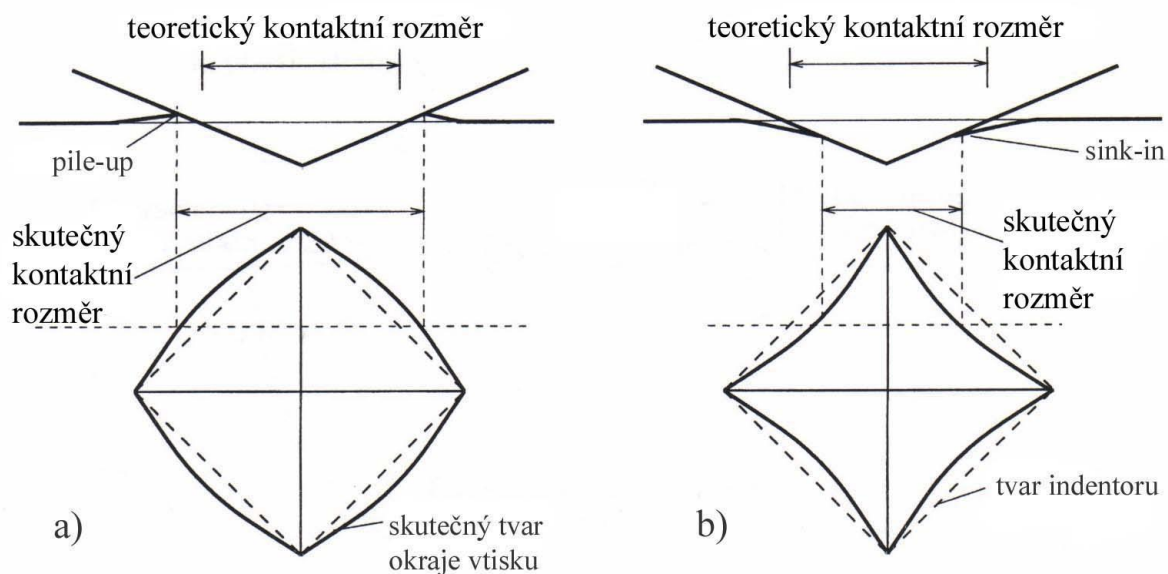
### 5.4.1 Faktory ovlivňující přesnost měření

Výsledky měření ovlivňuje řada vlivů. Jedním z nich je opotřebení hrotu indentoru. Mikroskopické zaoblení hrotu indentoru  $r$  má zanedbatelný vliv na závislost  $P-h$  v případě, že je splněna podmínka  $h > r / 40$ . Tření mezi indentorem a zkoušeným materiálem má také minimální vliv na výsledky měření tvrdosti a závislost  $P - h$  [3].

Výsledky měření ovlivňuje první bod vzájemného dotyku indentoru a zkoušeného materiálu. Při procesu indentace existuje hloubka proniknutí, která se nezaznamenává do výsledků měření. Pomalé přibližování hrotu indentoru ke zkoušenému materiálu vede k eliminaci problému [3].

Dalším z faktorů ovlivňující přesnost měření je efekt velikosti vtisku ISE (Indentation size effect). Efekt se projevuje jako změna mechanických vlastností převážně při velmi nízkých zatíženích. Naměřené hodnoty jsou závislé na velikosti zatížení. Snížení velikosti zatěžující síly vede k rostoucí hodnotám naměřené tvrdosti a klesající plasticitě [13].

Plastické vlastnosti měřeného materiálu v blízkosti vtisku ovlivňují svým chováním měřené výsledky. Při indentaci dochází ke změně tvaru vtisku. Na Obr. 5.6 jsou uvedeny dva možné stavy při indentační zkoušce pile-up a sink-in. Stav pile-up vzniká u materiálu s nižší pevností, kdy materiál tvoří nad povrchem vzorku vyvýšený okraj. Kontaktní plocha materiálu je větší, než je teoretická kontaktní plocha indentoru. Opačný stav vzniká u materiálů s vyšší pevností, kdy je materiál zatlačen pod povrch zkušební vzorku. Kontaktní plocha materiálu je v tomto případě větší, než je tomu u kontaktní plochy indentoru. Tento stav se nazývá sink-in [3].



Obr. 5.6: Deformace a) pile-up, b) sink-in [3]

## 6 Experimentální část

Předmětem této práce je porovnání tří vzorků se žárovým nástřikem typu Stellite 6. Vzorky a jejich hodnocení mají doplnit výsledky již zpracované diplomové práce studenta Bc. Petra Marchevky.

### 6.1 Experimentální vzorky

Předmětem zkoumání mechanických vlastností laserem modifikovaných vzorků jsou tyto tři dodané vzorky:

- S nástřikem HVOF
- Částečně přetavený nástřik
- Zcela přetavený nástřik

Parametry přípravy vzorků částečně přetaveného a zcela přetaveného vzorku ukazuje Tab. 6.2.

Vzorek	Výkon [W]	Energetická hustota [J/mm <sup>2</sup> ]	Rychlost pojezdu [cm/min]
Částečně přetavený	1070	21,4	25,0
Zcela přetavený	1070	42,8	12,5

Tab. 6.2: Parametry přípravy vzorků [8]

Tři dodané vzorky byly připraveny na pracovišti VZU Plzeň nástřikovým systémem TAFA JP 5000. Žárové nástřiky byly naneseny na ocelový plech s označením ČSN 11 527 o tloušťce 10 mm. Parametry přípravy udává Tab. 6.1 [8].

Použitý materiál	Stellite 6
Použitý prášek	FST 484.33
Složení	CoCrWC
Průtok kyslíku	966 l/m
Průtok kerosinu	277 l/h
Depoziční vzdálenost	360 mm
Barel	6"
Otáčky podavače	150 RPM
Nosný plyn	dusík
Průtok dusíku	6,5 l/m
Posuv	250 mm/sec
Offset	6 mm/ot

Tab. 6.1: Parametry HVOF žárového nástřiku Stellite 6 [8]

### 6.2 Experimentální zařízení

Pro vyhodnocování mechanických vlastností byla zvolena metoda instrumentované tvrdosti. Metoda se zde s výhodou využívá tam, kde není možné využít jinou metodu měření tvrdosti. Při měření pomocí nanoindentoru dochází k minimálnímu ovlivnění objemu

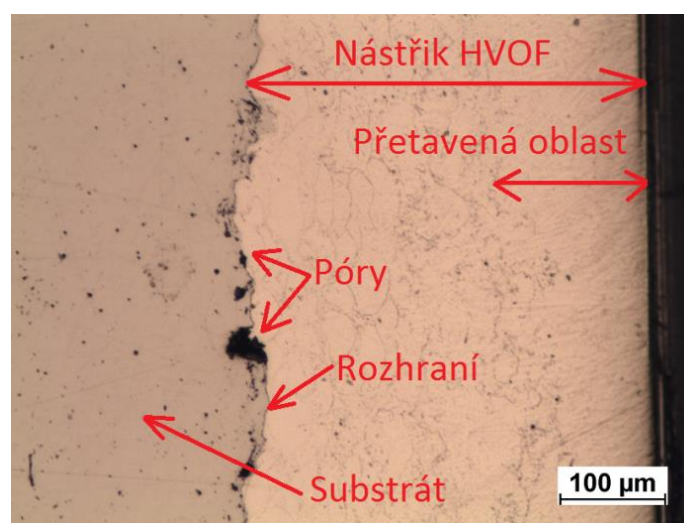
materiálu v okolí vtisku. Měření byla prováděna na přístroji Nanoindentor XP s modulem CSM (Continuous stiffness measurement). Během zatěžování dochází ke kontinuálnímu měření kontaktní tuhosti, to umožňuje určování hloubkových změn mechanických vlastností v průběhu jednoho vtisku. Nanoindentor byl vybaven Berkovičovým diamantovým indentorem ve tvaru jehlanu s trojúhelníkovou základnou, viz Obr. 5.5. Zatížení pro experiment bylo zvoleno 1mN. Metodou se stanovují mechanické vlastnosti, jde především o tvrdost a indentační modul pružnosti. V průběhu zatěžování se sleduje závislost zatížení P na hloubce proniknutí h hrotu do povrchu materiálu. Indentační křivka je charakterizována zatěžující a odlehčující větví.

### 6.3 Mikrostruktura

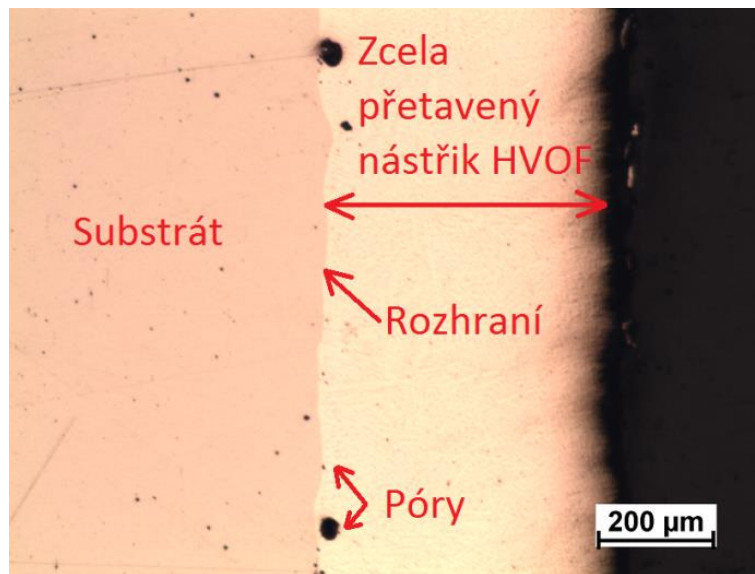
Na Obr. 6.1 je zobrazena mikrostruktura nepřetaveného vzorku s HVOF nástřikem. Depozice nástřiku probíhá unášením vysokou rychlostí roztavených, částečně roztavených a neroztavených částic prášku deponovaného materiálu směrem k substrátu. Mikrostruktura je lamelární s přítomností pórů. Na Obr. 6.2 je vidět struktura částečně přetaveného vzorku. Částečně přetavený nástřik obsahuje póry, které svojí velikostí přesahují póry vznikající při nanášení povlaku. Na Obr. 6.3 je pak struktura zcela přetaveného vzorku.



Obr. 6.1: Mikrostruktura nepřetaveného HVOF nástřiku



Obr. 6.2: Struktura částečně přetaveného vzorku

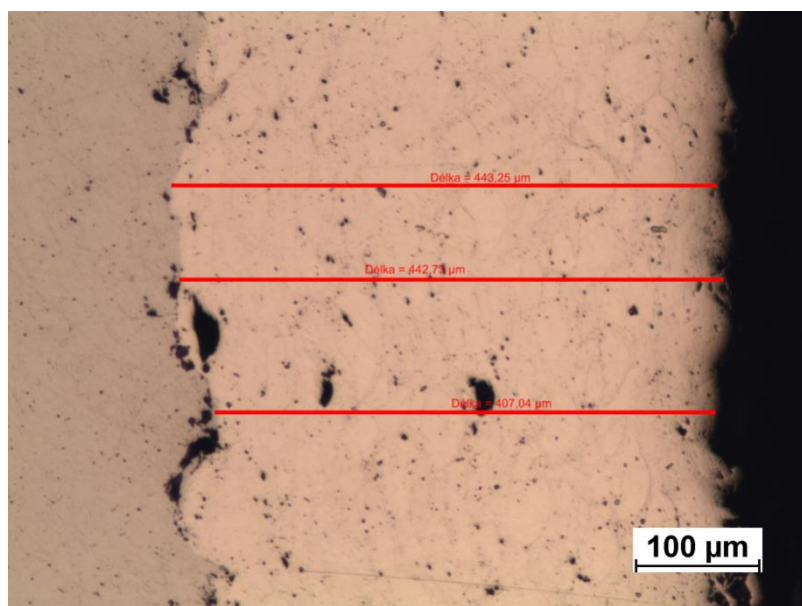


Obr. 6.3: Struktura zcela přetaveného vzorku

#### 6.4 Tloušťka nástřiku

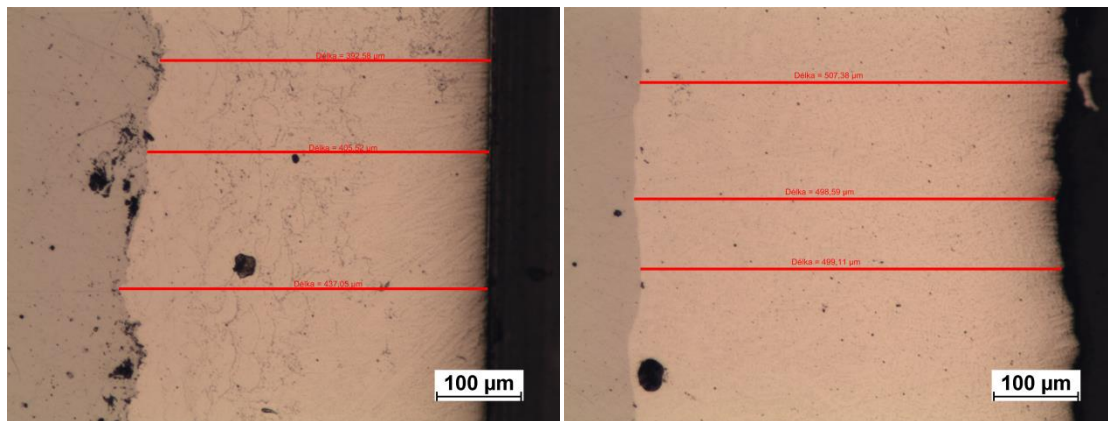
Vzorky byly zkoumané z hlediska tloušťky nástřiku. Hodnocení probíhalo pomocí metody počítačové analýzy obrazu NIS-Elements.

Na vzorku v nástřikem HVOF byla změřena tloušťka vrstvy  $431 \pm 17 \mu\text{m}$ . Měření vzdálenosti na různých místech vzorku ukazuje Obr. 6.4. Stejný postup vyhodnocení proběhl také na částečně přetaveném a zcela přetaveném vzorku. Naměřené hodnoty ukazuje Obr. 6.5 a Obr. 6.6.



Obr. 6.4: Tloušťka nástřiku HVOF





Obr. 6.5: Částečně přetavený nástřík

Obr. 6.6: Zcela přetavený nástřík

Každý vzorek byl měřen na sedmi různých místech. Výsledek zaokrouhlený na celé číslo vychází z naměřených hodnot a bere se jako aritmetický průměr se směrodatnou odchylkou. Z výsledků plyne, že největší tloušťka nástříku se vyskytuje u zcela přetaveného vzorku o velikosti  $520 \pm 19 \mu\text{m}$ . Sestupně následuje vzorek s nástříkem HVOF o velikosti  $431 \pm 17 \mu\text{m}$ . Nejmenší tloušťka nástříku byla odměřena na částečně přetaveném vzorku o velikost  $394 \pm 21 \mu\text{m}$ . Hodnoty naměřených tloušťek pro jednotlivé vzorky jsou uvedeny v Tab.6.3.

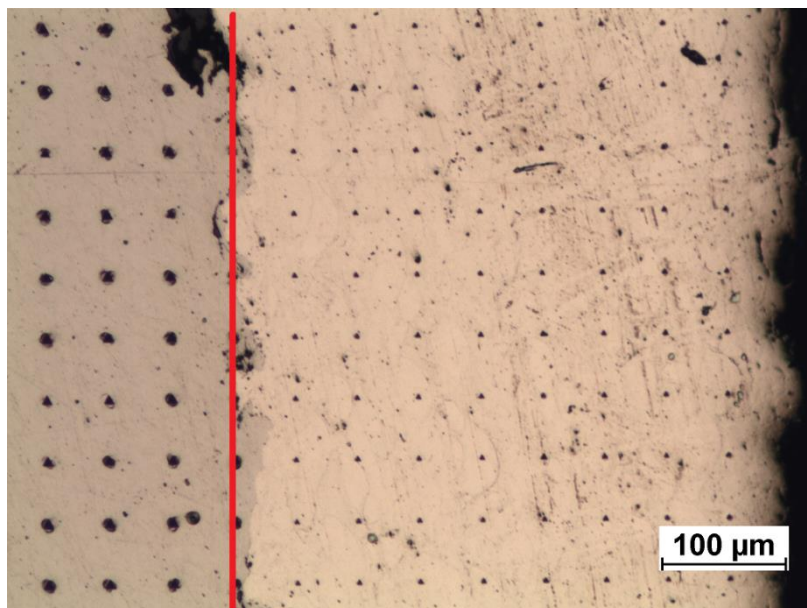
Měření	HVOF	Zcela přetavený	Částečně přetavený
1	443,25	507,38	392,58
2	442,73	498,59	405,52
3	407,04	499,11	437,05
4	400,32	525,48	390,51
5	438,60	554,97	379,12
6	437,56	516,17	363,08
7	445,32	537,90	393,09
Průměrná hodnota tloušťky vrstvy [ $\mu\text{m}$ ]	$431 \pm 17$	$520 \pm 19$	$394 \pm 21$

Tab. 6.3: Tloušťky vrstev nástříku pro jednotlivé vzorky

## 6.5 Měření tvrdosti a indentačního modulu pružnosti

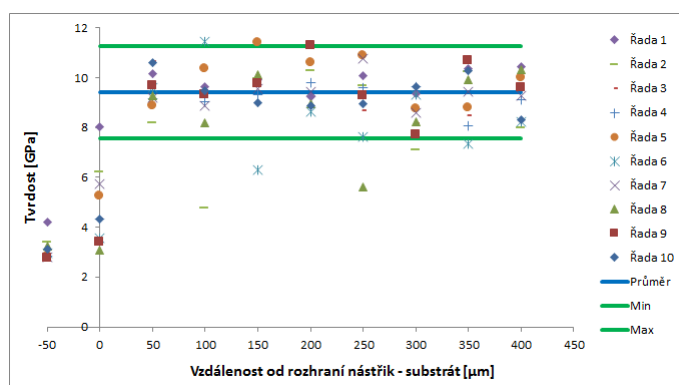
### 6.5.1 Vzorek s HVOF nástříkem

Na vzorku v HVOF nástříkem bylo provedeno 10 řad rovnoběžných vtisků. Jednotlivé vtisky ukazuje Obr. 6.7, kde červená vertikální přímka charakterizuje rozmezí mezi substrátem a nástříkem. Rozmezí se u tohoto vzorku bere jako pátý vtisk. Tato pozice vtisku je pro jednotlivé řady charakteristická tím, že se kvůli nehomogenitě rozhraní může vyskytovat v oblasti substrátu nebo nástříku. Vyhodnocení tvrdosti začíná krokem směrem doprava, šestým vtiskem. Tento vtisk zaručuje výskyt pouze v oblasti nástříku.



Obr. 6.7: Řady vtisků u vzorku s HVOF nástřikem

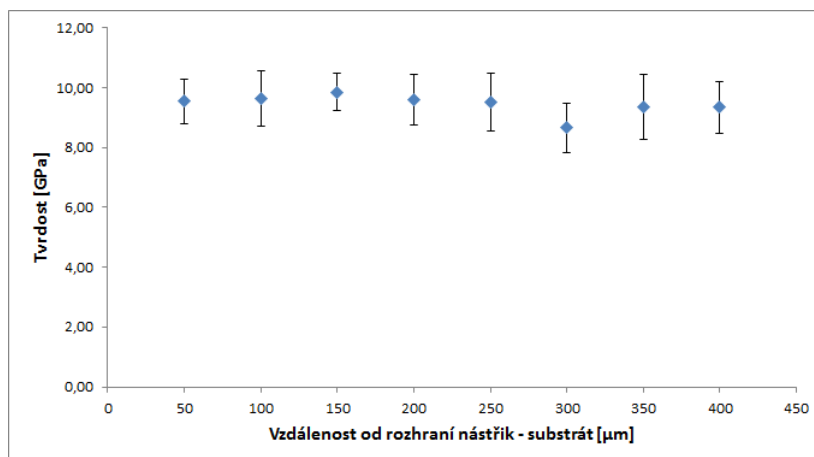
Na Obr. 6.8 je zachycen průběh všech deseti řad vtisků při měření tvrdosti v závislosti se změnou vzdálenosti od rozhraní směrem ven ze vzorku. Z důvodu výskytu trhlin a pórů v nástřiku, je voleno početnější množství řad měření. Interval měřených hodnot je vymezený zelenými horizontálními přímkami, které jsou ve vzdálenosti dvojnásobku směrodatné odchylky od průměrné hodnoty tvrdosti. Z naměřených hodnot byla určena průměrná velikost tvrdosti se směrodatnou odchylkou. Hodnota tvrdosti v nástřiku HVOF dosahuje hodnoty  $9,43 \pm 0,93$  GPa. Z výpočtu byly vyloučeny tři vtisky, které se vyskytují zcela mimo oblast ostatních hodnot. Jedná se o vtisk druhé řady umístěný ve vzdálenosti 100  $\mu\text{m}$  od rozhraní, dále byl vyloučen vtisk šesté řady umístěn 150  $\mu\text{m}$  od rozhraní. Třetí vyloučený vtisk byl do vzorku umístěn v osmé řadě ve vzdálenosti 250  $\mu\text{m}$ . Nízké hodnoty tvrdosti ukazují na umístění vtisku do póru nebo trhliny ve struktuře nástřiku.



Obr. 6.8: Naměřené hodnoty tvrdosti pro vzorek s HVOF nástřikem

Na Obr. 6.9 jsou vyneseny průměrné hodnoty tvrdosti se směrodatnou odchylkou pro určitou vzdálenost. Aritmetický průměr tvrdosti je hodnota zahrnující hodnoty tvrdosti všech deseti řad. Vypočtené průměrné hodnoty tvrdosti se směrodatnou odchylkou ukazují přehledně Tab. 6.4.



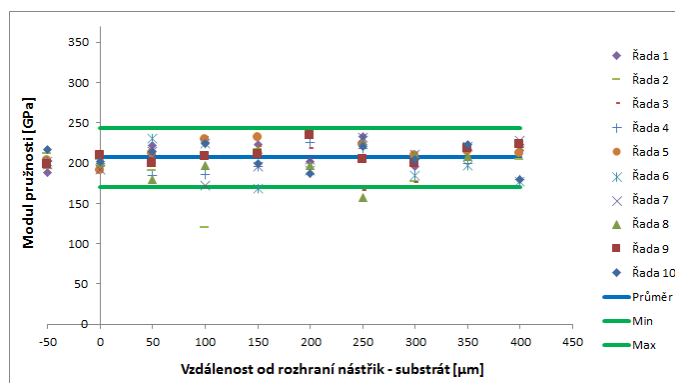


Obr. 6.9: Průběh tvrdosti vzorku s HVOF nástřikem

Vzdálenost od rozhraní [ $\mu\text{m}$ ]	Tvrdość [GPa]
50	$9,54 \pm 0,73$
100	$9,64 \pm 0,91$
150	$9,85 \pm 0,64$
200	$9,59 \pm 0,84$
250	$9,50 \pm 0,96$
300	$8,65 \pm 0,81$
350	$9,36 \pm 1,08$
400	$9,35 \pm 0,86$

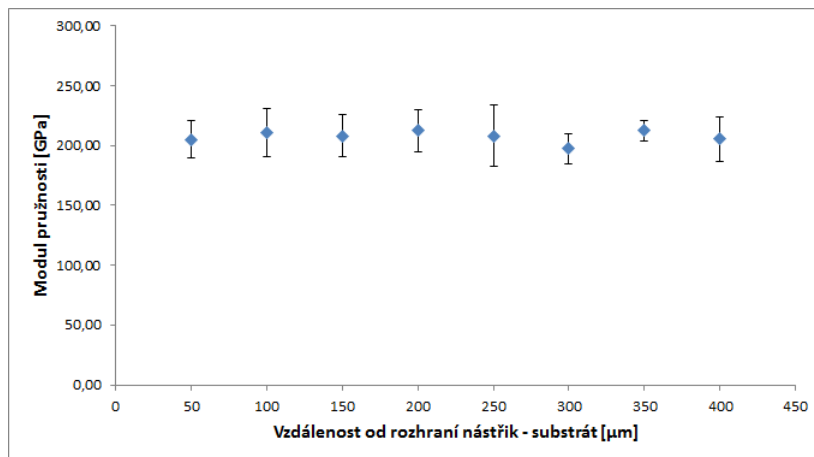
Tab. 6.4: Hodnoty tvrdosti vzorku s HVOF nástřikem

Vzorek s HVOF nástřikem byl hodnocen také z hlediska indentačního modulu pružnosti, naměřené hodnoty jsou zobrazeny na Obr. 6.10. Z naměřených hodnot byla vyloučena hodnota druhé řady umístěna ve vzdálenosti 100  $\mu\text{m}$  od rozhraní nástřik - substrát. Průměrná hodnota pro celý vzorek s HVOF nástřikem byla vypočtena  $207,46 \pm 18,28$  GPa.



Obr. 6.10: Naměřené hodnoty indentačního modulu pružnosti pro vzorek s HVOF nástřikem

Z naměřených hodnot indentačního modulu pružnosti byly spočítané průměrné hodnoty se směrodatnou odchylkou pro jednotlivé vzdálenosti od rozhraní. Průběh modulu pružnosti vzorku s HVOF nástřikem ukazuje Obr. 6.11. Hodnoty pro jednotlivé vzdálenosti ukazuje přehledně Tab. 6.5.



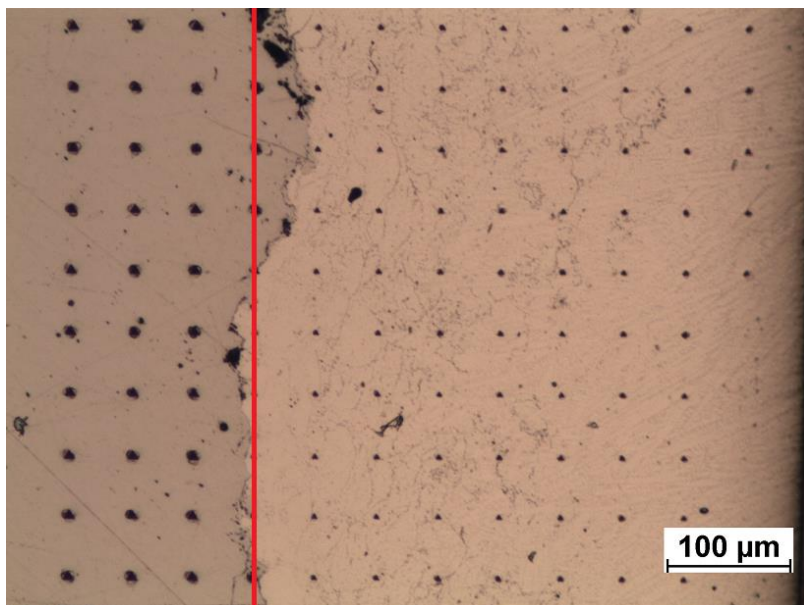
Obr. 6.11: Průběh modulu pružnosti pro vzorek s HVOF nástřikem

Vzdálenost od rozhraní [μm]	Modul pružnosti [GPa]
50	205,13 ± 15,75
100	210,78 ± 20,07
150	208,10 ± 17,56
200	212,70 ± 17,68
250	208,12 ± 25,54
300	197,33 ± 12,70
350	212,57 ± 8,50
400	205,26 ± 18,62

Tab. 6.5: Hodnoty modulu pružnosti vzorku s HVOF nástřikem

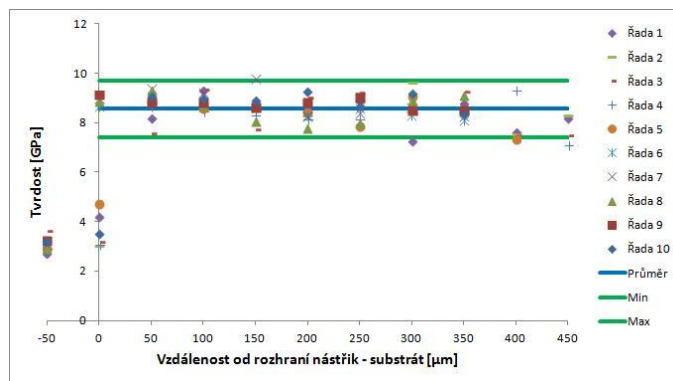
### 6.5.2 Částečně přetavený nástřík

Na Obr. 6.12 jsou zobrazeny řady vtisků na vzorku s částečně přetaveným nástřikem. Červená vertikální příčka, která značí nulovou hranici, je umístěna do pozice čtvrtého vtisku. Na této pozici se vtisky vyskytují v oblasti substrátu i v oblasti nástříku. Ve vzdálenosti 50 μm směrem doprava, je pro každý vtisk zaručeno, že se nachází v oblasti nástříku.



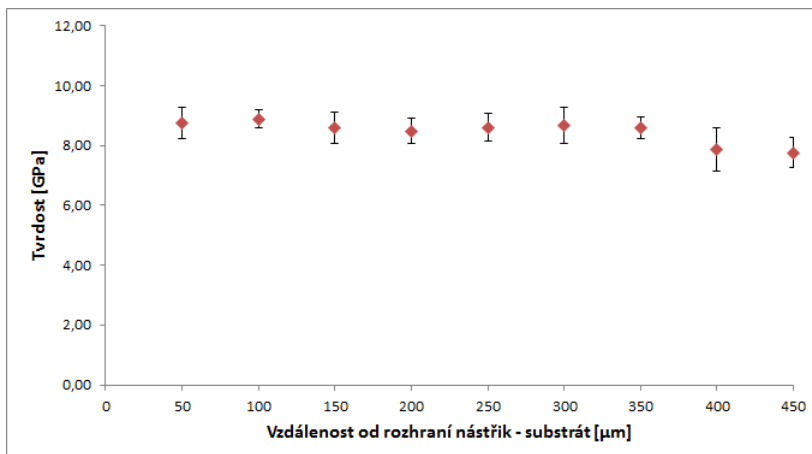
Obr. 6.12: Řady vtisků částečně přetaveného vzorku

Obr. 6.13 ukazuje naměřené hodnoty tvrdosti napříč vzorkem. Z naměřených hodnot je vidět, že díky částečnému přetavení vzorku se zužuje pásmo naměřených hodnot tvrdosti oproti vzorku s nástřikem HVOF, který nebyl přetavený. Pro vyhodnocení vzorku byly použity veškeré naměřené hodnoty tvrdosti. Vypočtená hodnota tvrdosti napříč vzorkem odpovídá průměrné hodnotě  $8,55 \pm 0,56$  GPa. Při porovnání s hodnotou tvrdosti vzorku s HVOF nástřikem je vidět, že tvrdost s částečným přetavením klesá a snižuje se také rozptyl v naměřených hodnotách tvrdosti.



Obr. 6.13: Naměřené hodnoty tvrdosti pro částečně přetavený nástřík

Obr. 6.14 ukazuje průběh tvrdosti napříč vzorkem. Průběh tvrdosti je v porovnání s nástřikem HVOF více konstantní, to je způsobeno právě částečným přetavením nástříku HVOF. Grafické vyjádření odpovídá očekávání, že tvrdost u částečně přetaveného vzorku bude nižší a sníží se také rozptyl v naměřených hodnotách. Částečným přetavením poklesla tvrdost na celém průřezu nástříku vzorku, avšak největší pokles je právě v přetavené oblasti na krajích vzorku ve vzdálenosti od 400 μm. Číselně jsou tyto výsledky vyjádřeny v Tab. 6.6.

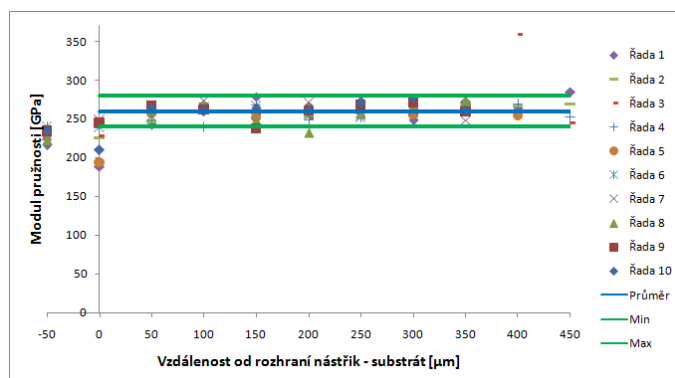


Obr. 6.14: Průběh tvrdosti pro částečně přetavený nástřik

Vzdálenost od rozhraní [ $\mu\text{m}$ ]	Tvrlost [GPa]
50	$8,75 \pm 0,50$
100	$8,88 \pm 0,30$
150	$8,58 \pm 0,52$
200	$8,49 \pm 0,42$
250	$8,60 \pm 0,46$
300	$8,66 \pm 0,60$
350	$8,58 \pm 0,35$
400	$7,86 \pm 0,73$
450	$7,76 \pm 0,50$

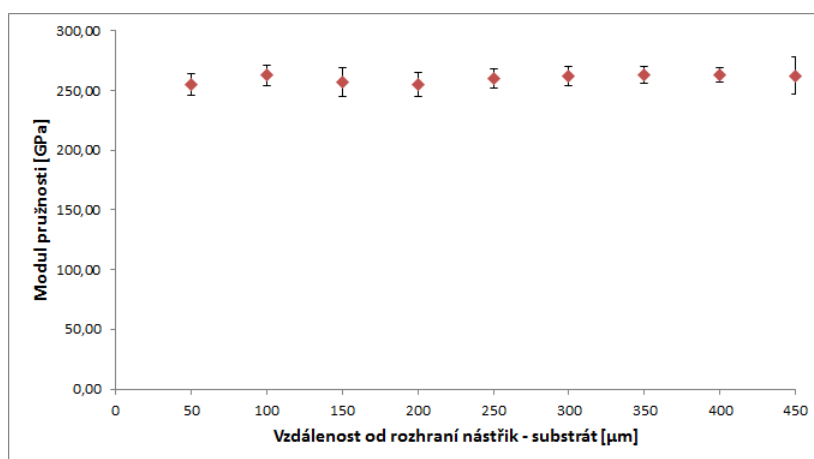
Tab. 6.6: Průměrné hodnoty tvrdosti částečně přetaveného nástřiku

Naměřené hodnoty modulu pružnosti pro částečně přetavený nástřik ukazuje Obr. 6.15. Z naměřených hodnot byla vyloučena hodnota třetí řady umístěna ve vzdálenosti 400  $\mu\text{m}$  od rozhraní nástřik - substrát. Z uvažovaných hodnot byl vypočten průměrný indentační modul pružnosti  $259,65 \pm 9,90$  GPa.



Obr. 6.15: Naměřené hodnoty modulu pružnosti pro částečně přetavený nástřik

Vlivem částečného přetavení HVOF nástřiku dochází k nárůstu hodnot indentačního modulu pružnosti. Nárůst hodnot nastává na celém příčném průřezu vzorku od rozhraní nástřik - substrát až po okraj vzorku. Zvýšení hodnot indentačního modulu pružnosti souvisí s poklesem tvrdosti po částečném natavení nástřiku. Při stejném zatížení proniká Berkovičův indentor do větší hloubky měřeného vzorku. Na Obr. 6.16 jsou vyznačeny průměrné hodnoty indentačního modulu pružnosti se směrodatnou odchylkou v jednotlivých vzdálenostech od rozhraní nástřik - substrát u částečně přetaveného vzorku. Změřené hodnoty se příliš neliší, jsou téměř konstantní, číselné vyjádření ukazuje přehledně Tab. 6.7.



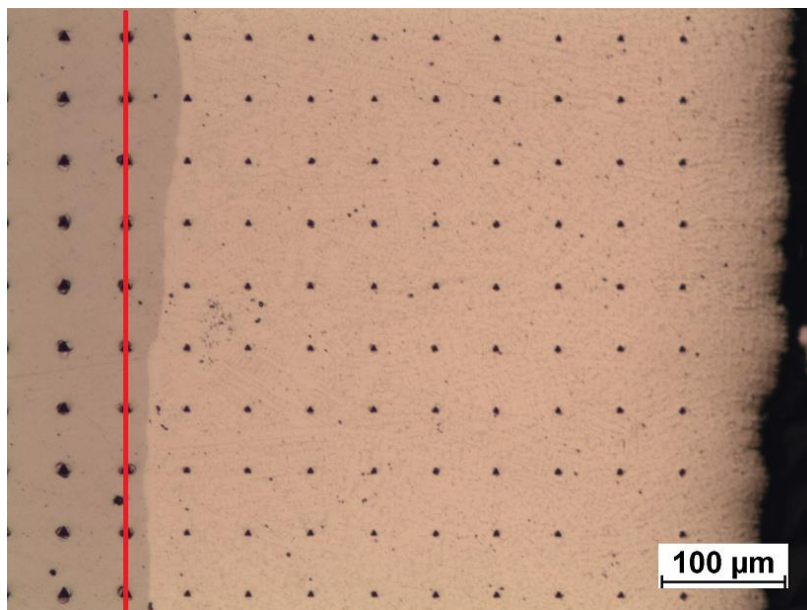
Obr. 6.16: Průběh modulu pružnosti pro částečně přetavený nástřik

Vzdálenost od rozhraní [μm]	Modul pružnosti [GPa]
50	254,73 ± 8,98
100	262,71 ± 8,63
150	256,98 ± 11,78
200	255,22 ± 9,97
250	260,17 ± 7,79
300	261,94 ± 8,19
350	263,27 ± 6,84
400	263,06 ± 5,75
450	262,46 ± 15,53

Tab. 6.7: Průměrné hodnoty modulu pružnosti pro částečně přetavený nástřik

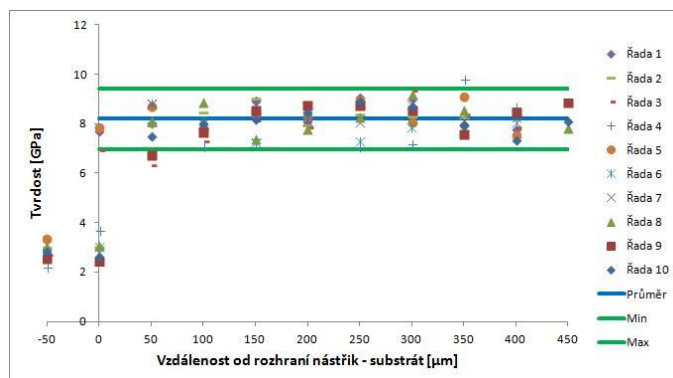
### 6.5.3 Zcela přetavený nástřik

Na Obr. 6.17 je zobrazen vzorek se zcela přetaveným nástřikem HVOF. Nulová hranice pro tento vzorek je volena jako v předchozím případě, jedná se o čtvrtý vtisk zleva.



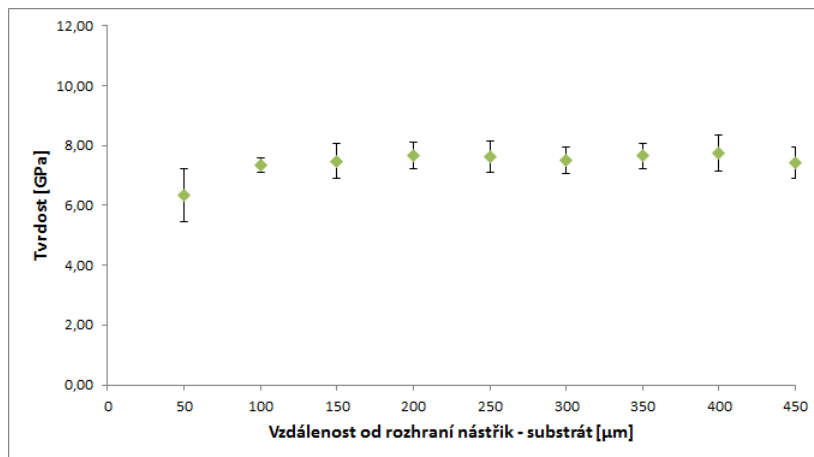
Obr. 6.17: Řady vtisků zcela přetaveného vzorku

Na Obr. 6.18 jsou zobrazeny naměřené hodnoty napříč vzorkem. Opět je vidět užší pásmo, jako v případě částečně přetaveného vzorku. Do výpočtu průměrné hodnoty tvrdosti byly zařazeny opět všechny vtisky měření, protože se žádný vtisk svojí hodnotou nevykymá oblasti ostatních vtisků měření. Z naměřených hodnot byla vypočtena průměrná hodnota tvrdosti  $7,44 \pm 0,65$  GPa.



Obr. 6.18: Naměřené hodnoty tvrdosti pro zcela přetavený nástřík

Před samotným vyhodnocováním výsledků měření se dalo očekávat, že bude tvrdost nižší, než v případě předchozích vzorků. Průměrné hodnoty indentačního modulu pružnosti pro vzorek, u kterého byl přetaven celý HVOF nástřík, jsou vidět na Obr. 6.19. Po vyhodnocení naměřených hodnot je vidět, že je průběh téměř konstantní v celém průřezu vzorku kromě oblasti blízké rozhraní nástřík – substrát. Zde nastává výraznější pokles tvrdosti. Toto lze vysvětlit tím, že zde dochází k promísení materiálu substrátu se Stellitem 6. Číselné vyjádření průběhu tvrdosti vzorku s přetaveným celým HVOF nástříkem ukazuje přehledně Tab. 6.8.

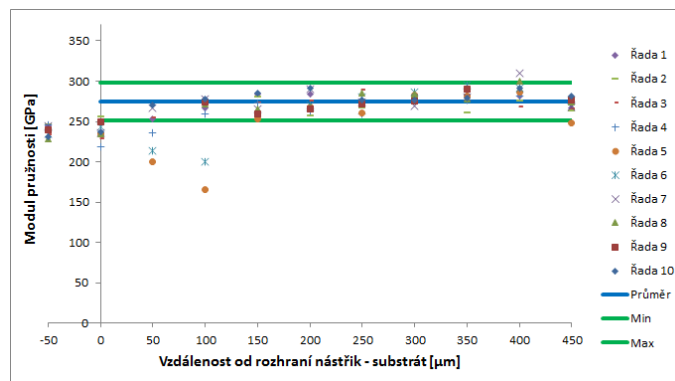


Obr. 6.19: Průběh tvrdosti zcela přetaveného vzorku

Vzdálenost od rozhraní [μm]	Tvrdost [GPa]
50	6,35 ± 0,88
100	7,35 ± 0,24
150	7,48 ± 0,58
200	7,66 ± 0,45
250	7,62 ± 0,52
300	7,50 ± 0,44
350	7,65 ± 0,43
400	7,75 ± 0,61
450	7,42 ± 0,52

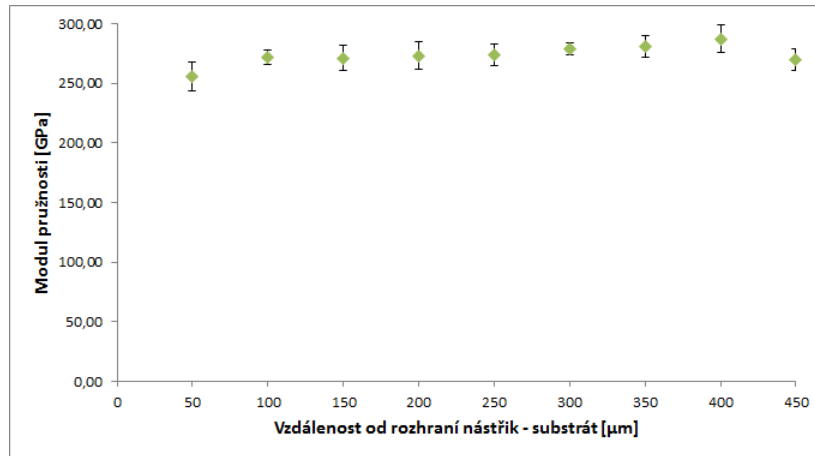
Tab. 6.8: Průměrné hodnoty tvrdosti zcela přetaveného nástřiku

Naměřené hodnoty indentačního modulu pružnosti jsou zobrazeny na Obr. 6.20. Pro potřeby vyhodnocování nebyly uvažovány vtisky z páté řady a šesté řady. V obou případech se jedná o vtisky umístěné ve vzdálenosti 50 μm a 100 μm od rozhraní nástřik - substrát. Z uvažovaných hodnot byla vypočtena průměrná hodnota indentačního modulu pružnosti se směrodatnou odchylkou  $274,57 \pm 11,88$  GPa.



Obr. 6.20: Naměřené hodnoty modulu pružnosti u zcela přetaveného vzorku

Zcela přetavený vzorek ukázal další pokles v tvrdosti oproti nepřetavenému a částečně přetavenému vzorku. Vzhledem k poklesu tvrdosti lze uvažovat nárůst hodnot indentačního modulu pružnosti. Obr. 6.21 ukazuje grafické vyjádření průběhu indentačního modulu pružnosti na jednotlivých místech vzorku. Číselné vyjádření měření ukazuje přehledně Tab. 6.9.



Obr. 6.21: Průběh modulu pružnosti u zcela přetaveného vzorku

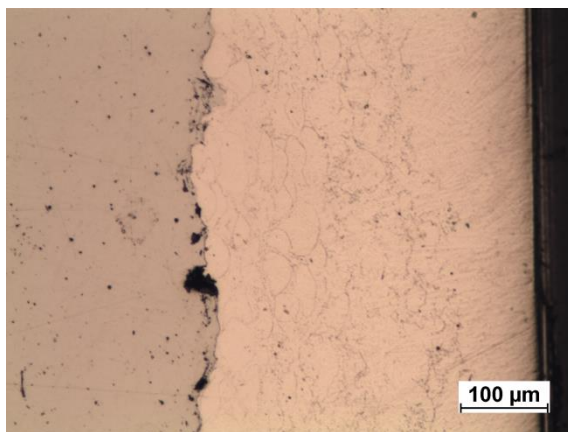
Vzdálenost od rozhraní [μm]	Modul pružnosti [GPa]
50	255,85 ± 12,07
100	271,83 ± 5,58
150	270,87 ± 10,62
200	273,22 ± 11,20
250	273,87 ± 9,33
300	279,09 ± 4,99
350	280,84 ± 8,72
400	287,20 ± 11,68
450	269,33 ± 9,04

Tab. 6.9: Průměrné hodnoty modulu pružnosti pro zcela přetavený nástřik

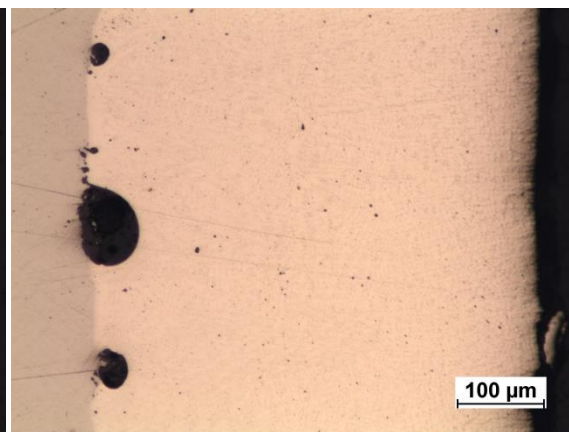


## 7 Diskuze výsledků

Snímky mikrostruktury byly pořízeny pomocí metody počítačové analýzy obrazu NIS - Elements. Při pozorování mikrostruktury bylo vidět, jakým způsobem se mění mikrostruktura vlivem laserového přetavení. U částečně přetaveného vzorku dochází k homogenizaci mikrostruktury jen v úzké oblasti na okraji vzorku. V oblasti rozhraní nástřik - substrát nedochází k žádnému ovlivnění mikrostruktury, viz Obr. 7.1. U zcela přetaveného nástřiku dochází k ovlivnění celé oblasti, viz Obr. 7.2. Dochází ke změnám na rozhraní, které po laserovém přetavení obsahuje méně defektů. Přesto lze na rozhraní nástřik - substrát a v nástřiku Stellite 6 pozorovat póry.



Obr. 7.1: Struktura částečně přetaveného nástřiku



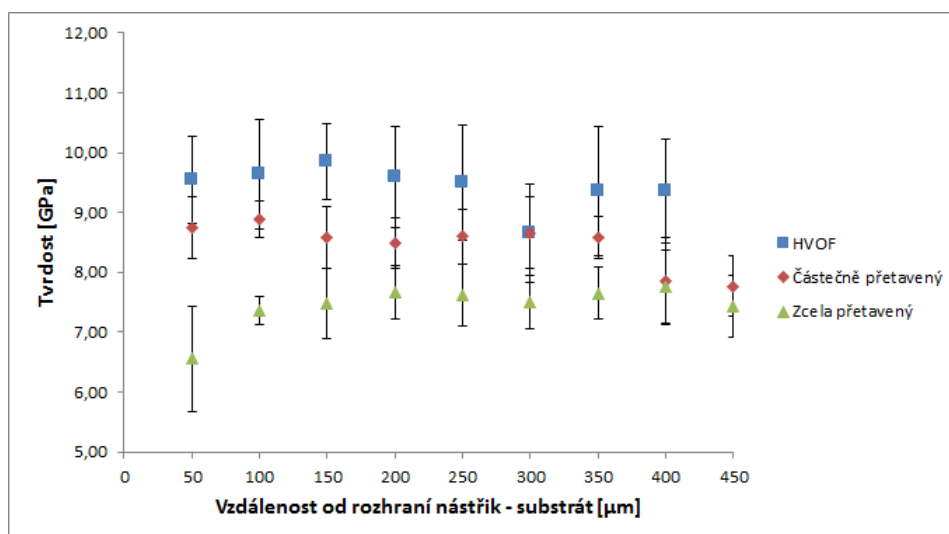
Obr. 7.2: Struktura zcela přetaveného nástřiku

Tloušťka povlaků byla hodnocena na sedmi místech vzorku. Z naměřených hodnot byla určena průměrná hodnota a směrodatná odchylka, viz Tab. 7.1. U nepřetaveného nástřiku HVOF byla naměřena průměrná hodnota  $431 \pm 17 \mu\text{m}$ . Podobná hodnota byla naměřena u vzorku částečně přetaveného, protože zde nedochází k ovlivnění rozhraní nástřik - substrát. U zcela přetaveného vzorku je vidět výrazný nárůst v měřené tloušťce povlaku. Při laserovém přetavení dochází k ovlivnění nejen žárového nástřiku, ale také materiálu substrátu. Na rozhraní dochází k promíšení materiálu substrátu se Stellite 6. Laserové přetavení způsobí posun rozhraní směrem dovnitř vzorku. Z tohoto důvodu jsou hodnoty tloušťky vrstvy u zcela přetaveného nástřiku měřeny větší, než je tomu v předchozích případech.

Vzorek	HVOF	Částečně přetavený	Zcela přetavený
Průměrná hodnota tloušťky vrstvy [ $\mu\text{m}$ ]	$431 \pm 17$	$394 \pm 21$	$520 \pm 19$

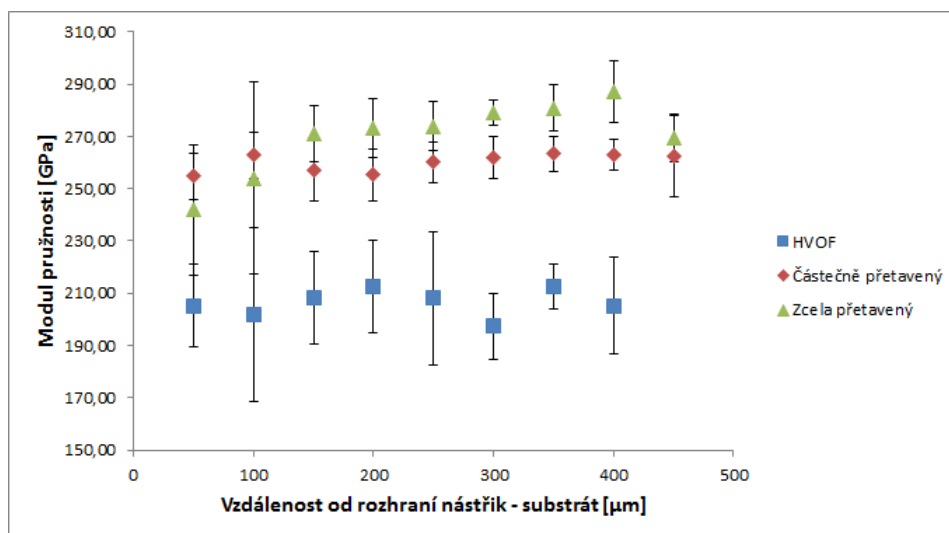
Tab. 7.1: Tloušťky vrstev nástřiku pro jednotlivé vzorky

V Obr. 7.3 je vidět souhrn průběhů tvrdostí jednotlivých vzorků. Do tohoto grafu byly umístěny průběhy tvrdostí všech tří měřených vzorků. Při vyhodnocování tvrdosti se projevila nehomogenita žárového nástřiku HVOF. Nepřetavený vzorek se vykazoval největší hodnotou tvrdosti a s největším rozptylem měřených hodnot. U laserově přetavených vzorku je vidět pokles tvrdosti a zmenšení směrodatné odchylky. Pokles tvrdosti je způsoben homogenizací natavené vrstvy žárového nástřiku, kdy může dojít ke snížení vnitřního pnutí.



Obr. 7.3: Průběh tvrdosti pro všechny měřené vzorky

Při hodnocení indentačního modulu pružnosti byly výsledky zcela opačné, viz Obr. 7.4. Největší hodnota indentačního modulu pružnosti byla odměřena u vzorku zcela přetaveného. Následoval vzorek částečně přetavený a nejmenší hodnota byla změřena u vzorku s HVOF nástříkem. Tvrdší materiál klade větší odpor proti proniknutí indentoru, a proto je pořadí opačné. Naměřené hodnoty tvrdosti a indentačního modulu pružnosti jednotlivých vzorků ukazuje přehledně Tab. 7.2.



Obr. 7.4: Průběh indentačního modulu pružnosti pro všechny naměřené vzorky

Vzorek	Tvrdost [GPa]	Modul pružnosti [GPa]
HVOF	9,43 ± 0,93	207,46 ± 18,28
Částečně přetavený	8,55 ± 0,56	259,65 ± 9,90
Zcela přetavený	7,44 ± 0,65	274,57 ± 11,88

Tab. 7.2: Naměřené hodnoty tvrdosti pro jednotlivé vzorky

## 8 Závěr

Cílem této bakalářské práce bylo posoudit lokální mechanické vlastnosti u tří dodaných vzorků. Vyhodnocení experimentální části bakalářské práce probíhalo na třech vzorcích. Pro vytvoření žárového nástřiku byla zvolena metoda HVOF s použitým materiálem Stellite 6. Žárový nástřík byl vytvořen na ocelovém plechu s označením ČSN 11 527. Příprava žárového nástřiku proběhla na pracovišti VZU Plzeň s využitím nástřikového systému TAFA JP 5000. Pro potřeby vzájemného porovnání lokálních mechanických vlastností byly dva vzorky podrobeny laserovému přetavení. Laserové přetavení proběhlo na zařízení s označením ISL-4000L HPDD v NTC ZČU. Předmětem zkoumání jsou vzorky s různou velikostí přetavení. V závislosti na parametrech přetavení bylo dosaženo částečně přetaveného a zcela přetaveného vzorku. Třetí vzorek byl zkoumán ve stavu po nástřiku HVOF. Příprava metalografických výbrusů proběhla v laboratoři NTC Plzeň. Vzorky byly současně broušeny, leštěny a zality do tvrdnoucí směsi za stejných podmínek.

Připravené zkušební vzorky byly zkoumané z hlediska mikrostruktury a tloušťky nástřiku s pomocí světelného mikroskopu NIKON s obrazovou analýzou obrazu NIS-Elements. K hodnocení lokálních mechanických vlastností z hlediska tvrdosti a indentačního modulu pružnosti byla využita metoda instrumentované tvrdosti. Nanoindentorem bylo na vzorku vytvořeno několik řad vtisků, které byly následně vyhodnocovány.

Hodnocení zkušebních vzorků prokázalo změny lokálních mechanických vlastností mezi jednotlivými vzorky. Při přetavení žárového nástřiku se mění hodnoty tvrdosti i indentačního modulu pružnosti. Přetavené vzorky vykazovaly menší rozptyl naměřených hodnot tvrdosti a indentačního modulu pružnosti. Mikrostruktura se vykazuje vyšší homogenitou a snížením pórovitosti v nástřiku.

## 9 Seznam použité literatury

- [1] Šulc, J. *Lasery a jejich aplikace*. 2002.
- [2] ] <http://www.pf.jcu.cz>. *Princip laseru*. [Online] [Citace: 13.5.2016.]  
<http://www.pf.jcu.cz/stru/katedry/fyzika/prof/Svadlenkova/Princip%20laseru.pdf>
- [3] NÉGYESI, M.: *Vliv obsahu vodíku ve slitině na mechanické vlastnosti Zr-slitin používaných jako povlak PE po teplotních přechodech typu LOCA* [Bakalářská práce]. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2007, 67 s.
- [4] SKÁLOVÁ, J. – KOVAŘÍK R. – BENEDIKT V.: *Základní zkoušky kovových materiálů*. 4. vydání, Plzeň: TYPOS, 2005.
- [5] <http://www.ateam.zcu.cz> Oddělení povrchové inženýrství. Ateam [Online] [Citace 2.12.2015.] [http://www.ateam.zcu.cz/Zkousky\\_tvrlosti.pdf](http://www.ateam.zcu.cz/Zkousky_tvrlosti.pdf)
- [6] VIZINA, M., BLÁHOVÁ, O. *Evaluation of oxide layers ZrO<sub>2</sub> with the use of instrumented hardness testing. Vrstvy a povlaky*, Demänovská Dolina: 2005
- [7] ŠTĚPÁNEK, I. – BLÁHOVÁ, O. – KOLEGA, M.: *Tenké vrstvy – vytváření, vlastnosti*. Plzeň: 1994.
- [8] MARCHEVKA, P.: *Aplikace technologie laserového přetavení HVOF stříkaných povlaků ke zvýšení kvality povlaků na bázi Co* [Diplomová práce]. Plzeň: ZČU v Plzni, 2014, 76s.
- [9] KANNATEY-ASIBU, Jr, E. *Principles of laser materials processing*. 2009. ISBN 978-0-470-17798-3.
- [10] ION, J. C. *Laser Processing of Engineering Materials*. 2005. ISBN 0 7506 6079 1.
- [11] HOUDKOVÁ, Š., ENŽL, R., BLÁHOVÁ, O.: *Žárové nástřiky - moderní technologie povrchových úprav*. Multimediální učebnice - CD. Plzeň 2003
- [12] Skúšky tvrdosti. MatNet [Online] [Citace 1.12.2015.]  
<http://www.matnet.sav.sk/index.php?ID=531>
- [13] Oddělení povrchové inženýrství. Ateam [online]. Ateam, [Citace 14.5.2016]. Dostupné z: [http://www.ateam.zcu.cz/Zkousky\\_tvrlosti.pdf](http://www.ateam.zcu.cz/Zkousky_tvrlosti.pdf)
- [14] <http://www.gordonengland.co.uk>. [Online] [Citace: 10.11.2015.]  
<http://www.gordonengland.co.uk/hardness/knoop.gif>
- [15] <http://www.flamespraytech.ru>. [Online] [Citace: 13.5.2016.]  
<http://www.flamespraytech.ru/upload/hv-50-hvof-system-jp5000-in-action.jpg>
- [16] <https://cs.wikipedia.org/wiki/Laser>. [Online] [Citace: 1.11.2015.]  
<https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/1/1f/Laser.svg>
- [17] [https://cs.wikipedia.org/wiki/Stimulovan%C3%A1\\_emise](https://cs.wikipedia.org/wiki/Stimulovan%C3%A1_emise). [Online] [Citace: 1.11.2015.]  
<https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/8/8a/Stimulatedemission.png>
- [18] <http://www.lascam.cz>. [Online] [Citace: 13.5.2016.]  
<http://www.lascam.cz/wp-content/uploads/2015/10/laserove-kaleni1.jpg>

[19] <http://www.perkins-dily.cz>. [Online] [Citace: 18.5.2016.]

<http://files.perkins-dily.webnode.cz/200000545-4314f440ec/Img0071%20Standard%20Monometal%20Polished%20Piston.jpg>

[20] <http://www.emeraldinsight.com>. [Online] [Citace: 20.11.2015.]

[http://www.emeraldinsight.com/content\\_images/fig/1560160403002.png](http://www.emeraldinsight.com/content_images/fig/1560160403002.png)

[21] JASIM, K. M. a WEST, D.R. F. *High Power Lasers and Laser Machning Technology*. 1989. Spie Vol. 1132.