

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA STROJNÍ

Studijní program: N 2301
Studijní obor: 3911T016

Strojní inženýrství
Materiálové inženýrství strojírenská metalurgie

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Zhodnocení tepelného vlivu laseru na mikrostrukturu a vlastnosti HVOF
žárových nástřiků

Autor: **Bc. Jan Jícha**

Vedoucí práce: **Ing. Šárka Houdková, Ph.D.**

Akademický rok 2017/2018

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta strojní

Akademický rok: 2017/2018

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Jan JÍCHA**

Osobní číslo: **S15N0103P**

Studijní program: **N2301 Strojní inženýrství**

Studijní obor: **Materiálové inženýrství a strojírenská metalurgie**

Název tématu: **Zhodnocení tepelného vlivu laseru na mikrostrukturu
a vlastnosti HVOF žárových nástřiků**

Zadávací 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. Úvod - motivace.
2. Analýza současného stavu
 - a) Technologie žárového nástřiku.
 - b) Laserové technologie povrchového zpracování.
 - c) Povlaky na bázi tvrdokovů.
3. Experimentální zhodnocení vlivu laserového zpracování na vlastnosti HVOF nástřiku
 - a) Optimalizace parametrů laserového přetavení.
 - b) Analýza změn mikrostruktury.
 - c) Analýza změn mechanických a tribologických vlastností.
4. Diskuze výsledků.
5. Závěr.

Rozsah grafických prací: **fotodokumentace, obrázky**

Rozsah kvalifikační práce: **50 - 60 stran**

Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

L. Pawlowski, *The Science and Engineering of Thermal Spray Coatings* John Wiley and Sons, Ltd. 2008

G. Buchfink. *Laser as a tool* Vogel Buchverlag, 2007

J. Mateos , J.M. Cuetos, R. Vijande, E. Fernandez. *Tribological properties of plasma sprayed and laser remelted 75/25 Cr₃C₂/NiCr coatings* *Tribology International* 34 (2001) 345-351

Junji Morimoto, Yoh Sasaki, Shinji Fukuhara, Nobuyuki Abe, Masahiro Tukamoto, *Surface modification of Cr₃C₂-NiCr cermet coatings by direct diode laser* *Vacuum* 80 (2006) 1400-1405

B.S. Mann, *High Power Diode Laser-Treated HP-HVOF and Twin Wire Arc-Sprayed Coatings for Fossil Fuel Power Plants* *Journal of Materials Engineering and Performance* Volume 22(8), 2013-2200

L. Janka, J. Norpoth, S. Eicher, P. Vuoristo, *Improving the toughness of thermally sprayed Cr₃C₂-NiCr hardmetal coatings by laser post-treatment* *Materials and Design* 98, 2016

P. Marchevka, *Aplikace technologie laserového přetavení HVOF stříkaných povlaků ke zvýšení kvality povlaků na bázi Co* diplomová práce, KMM ZČU, 2014

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Šárka Houdková Šimůnková, Ph.D.**

Nové technologie - výzkumné centrum

Konzultant diplomové práce: **Ing. Marek Vostřák**

Nové technologie - výzkumné centrum

Datum zadání diplomové práce: **20. září 2017**

Termín odevzdání diplomové práce: **25. května 2018**

Doc. Ing. Milan Edl, Ph.D.
děkan



Prof. Dr. Ing. Antonín Kříž
vedoucí katedry

V Plzni dne 20. září 2017

Prohlášení o autorství

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

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

V Plzni dne:

.....

podpis autora

ANOTAČNÍ LIST DIPLOMOVÉ PRÁCE

AUTOR	Příjmení Jícha	Jméno Jan	
STUDIJNÍ OBOR	3911T016 „Materiálové inženýrství a strojírenská metalurgie“		
VEDOUCÍ PRÁCE	Příjmení (včetně titulů) Ing. Houdková, Ph.D.	Jméno Šárka	
PRACOVIŠTĚ	ZČU – FST – KMM		
DRUH PRÁCE	DIPLOMOVÁ	BAKALÁŘSKÁ	Nehodící se škrtněte
NÁZEV PRÁCE	Zhodnocení vlivu tepelného zpracování laseru na mikrostrukturu a vlastnosti HVOF žárových nástřiků		

FAKULTA	Strojní	KATEDRA	KMM	ROK ODEVZD.	2018
----------------	---------	----------------	-----	--------------------	------

POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

CELKEM	97	TEXTOVÁ ČÁST	45	GRAFICKÁ ČÁST	29
---------------	----	---------------------	----	----------------------	----

STRUČNÝ POPIS ZAMĚŘENÍ, TÉMA, CÍL POZNATKY A PŘÍNOSY	<p>Předkládaná diplomová práce se zabývá využitím technologie laserového tepelného zpracování k modifikaci HVOF nástřiku na bázi cermetu. Žárový nástřik $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-}25\%\text{CoNiCrAlY}$ byl tepelně ovlivněn pomocí vysokovýkonného diodového laseru. Mikrostruktura tepelně ovlivněného povlaku byla zkoumána pomocí optické mikroskopie a SEM/EDX analýz. Mechanické a tribologické vlastností byly hodnoceny měřením mikrotvrdomosti a testy opotřebení dle ASTM G-133 a ASTM G-65.</p> <p>Práce potvrdila vliv laserového tepelného zpracování na změny mikrostruktury v závislosti na použitých parametrech laserového zpracování. Byl prokázán pozitivní vliv laserového zpracování na zvýšení tvrdosti, snížení koeficientu tření a odolnosti povlaku proti kluznému opotřebení dle ASTM G-133. V případě odolnosti proti abrazivnímu opotřebení byl pozorován negativní vliv laserového zpracování z důvodů vzniku podpovrchových trhlin a degradace materiálu povlaku příměsí Fe z nataveného substrátu.</p> <p>Přínosem práce je zejména prokázán potenciál využití laserového tepelného zpracování ke zlepšení charakteristik kluzného tření a opotřebení HVOF nástřiku $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-}25\%\text{CoNiCrAlY}$.</p>
	KLÍČOVÁ SLOVA

SUMMARY OF DIPLOMA SHEET

AUTHOR	Surname Jícha	Name Jan	
FIELD OF STUDY	3911T016 „Materials Engineering and Engineering Metallurgy“		
SUPERVISOR	Surname (Inclusive of Degrees) Ing. Houdková, Ph.D.	Name Šárka	
INSTITUTION	ZČU – FST – KMM		
TYPE OF WORK	DIPLOMA	BACHELOR	Delete when not applicable
TITLE OF THE WORK	Evaluation of the microstructure and properties of HVOF sprayed coating thermal treated by laser		

FACULTY	Mechanical Engineering	DEPARTMENT	Material Science and Technology	SUBMITTED IN	2018
----------------	------------------------	-------------------	---------------------------------	---------------------	------

NUMBER OF PAGES (A4 and eq. A4)

TOTALLY	97	TEXT PART	45	GRAPHICAL PART	29
----------------	----	------------------	----	-----------------------	----

BRIEF DESCRIPTION TOPIC, GOAL, RESULTS AND CONTRIBUTIONS	<p>The presented diploma thesis is focused on application of the laser surface remelting technology onto of HVOF sprayed hardmetal-based coating. The Cr₃C₂-25%CoNiCrAlY thermal sprayed coating was melted by a high powerdiode laser. The microstructure of the heat-affected coating was examined by optical microscopy and SEM/EDX analyses. The mechanical and tribological properties were analyzed using the microhardness measurement and wear tests performed according to ASTM G-133 and G-65.</p> <p>In the diploma theses, the influence of laser treatment on the microstructural changes was confirmed in dependence on used laser process parameters. The positive influence on the microhardness, coefficient of friction and wear sliding wear resistance measured in agreement with ASTM G-133 was proved. On the contrary, the abrasive wear resistance the negative influence of laser treatment was observed, namely due to the introduction of subsurface cracks and degradation of the coating material by dilution of Fe, originating from melted substrate material.</p>
KEY WORDS	HVOF, cermet coatings, microstructure, mechanical and tribological properties,

Poděkování

Na tomto místě bych rád poděkoval vedoucí diplomové práce paní Ing. Šárce Houdkové, Ph.D. za příkladné vedení, podmětné rady a nesmírnou ochotu po celý průběh psaní této diplomové práce. Rovněž bych chtěl poděkovat panu Ing. Marku Vostrákovi za rady a spolupráci při konzultacích. Dále bych velmi rád poděkoval panu Bc. Ladislavu Smetákovi za pomoc při metalografickém zpracování vzorků a měření.

Zajisté bych chtěl poděkovat všem akademickým i neakademickým pracovníkům, kteří mi jakkoliv pomohli během této práce, zvláště pak panu prof. Dr. Ing. Antonínu Křížovi.

Dále bych rád poděkoval mé rodině za podporu během mého studia na Západočeské Univerzitě v Plzni, fakulty strojní.

Děkuji.

Obsah

Použité zkratky a symboly.....	9
Úvod.....	11
1. Laser.....	12
1.1. Princip laseru.....	12
1.2. Typy laserů.....	14
1.2.1. Pevnolátkové lasery.....	15
1.2.2. Kapalinové lasery.....	15
1.2.3. Plynové lasery.....	15
1.2.4. Polovodičové lasery.....	15
1.2.4.1. Princip funkce laserových diod.....	15
1.3. Průmyslové využití laserových technologií.....	17
2. Modifikace povrchu laserem.....	18
2.1. Tepelné zpracování povrchu laserem – laserové kalení.....	18
2.2. Laserové přetavení.....	19
2.3. Laserové navařování.....	20
2.4. Laserem asistovaná fyzikální depozice z plynné fáze.....	21
2.5. Vytvrzení povrchové vrstvy materiálu rázovou vlnou.....	22
3. Povlaky.....	23
3.1. Žárové nástřiky.....	24
3.1.1. Struktura žárových nástřiků.....	26
3.1.1.1. Splaty.....	26
3.1.1.2. Oxidické vměstky.....	26
3.1.1.3. Póry.....	26
3.1.2. Rozdělení žárových nástřiků.....	27
4. Vysokorychlostní nástřik plamenem (HVOF).....	28
4.1. Princip HVOF.....	28
4.2. Aplikace HVOF nástřiků.....	29
4.3. Výhody a nevýhody HVOF nástřiků.....	30
5. Materiály vhodné k nanášení pomocí HVOF.....	31
5.1. Povlaky na bázi cermetů.....	31

5.1.1.	Povlaky na bázi CrC.....	31
5.1.1.1.	Cr ₃ C ₂ -25%CoNiCrAlY	31
5.1.2.	Povlaky na bázi WC	32
5.2.	Povlaky na bázi slitin.....	32
5.2.1.	Povlaky na bázi slitin Co.....	32
5.2.2.	Povlaky na bázi slitin Ni	33
6.	Následné zpracování žárových nástřiků	34
6.1.	Tepelné ovlivnění	34
6.1.1.	Elektromagnetické ovlivnění.....	34
6.1.1.1.	Elektrické jiskrové spékání	34
6.1.1.2.	Mikrovlnné slinování	34
6.1.1.3.	Elektronový paprsek	34
6.1.2.	Ohřev v peci	34
6.1.3.	Izostatické lisování za tepla.....	35
6.1.4.	Natavení plamenem.....	35
6.2.	Impregnace.....	35
6.3.	Mechanické zpracování.....	36
7.	Laserové zpracování žárově stříkaných povlaků.....	37
	Experimentální část.....	39
8.	Použité experimentální metody	40
8.1.	Analýza mikrostruktury	40
8.2.	Měření průběhu mikrotvrdotí	41
8.3.	Měření opotřebení metodou Ball-on-Flat dle ASTM G-133.....	42
8.4.	Měření opotřebení metodou Dry sand rubber wheel test dle ASTM G-65.....	44
9.	Příprava vzorků	45
9.1.	Příprava HVOF nástřiku.....	45
9.2.	Laserové zpracování.....	46
9.2.1.	Použitá technologie laseru.....	46
9.2.2.	Parametry laserového zpracování.....	46
10.	Optimalizace parametrů laserového zpracování vybraného HVOF povlaku	49
11.	Výsledky.....	52
11.1.	Hodnocení mikrostruktury povlaků	52

11.1.1.	Neovlivněný nástřik.....	52
11.1.2.	Ovlivněný nástřik	53
11.1.3.	Přetavený nástřik	54
12.	Hodnocení průběhu mikrotvrdosti HV0,3	56
12.1.	Neovlivněný nástřik	56
12.2.	Ovlivněný nástřik.....	57
12.3.	Přetavený nástřik	58
13.	Hodnocení opotřebení dle ASTM G-133	59
13.1.	Neovlivněný nástřik	59
13.2.	Ovlivněný nástřik.....	61
13.3.	Přetavený nástřik.....	63
14.	Analýza změn opotřebení dle ASTM G-65	65
14.1.	Neovlivněný nástřik	65
14.2.	Ovlivněný nástřik.....	67
14.3.	Přetavený nástřik	69
15.	Diskuze výsledků.....	71
15.1.	Mikrostruktura povlaků	71
15.2.	Porovnání hodnot výsledků měření mikrotvrdosti.....	73
15.1.	Porovnání hodnot výsledků měření proti opotřebení dle ASTM G-133.....	74
15.2.	Porovnání hodnot výsledků měření proti opotřebení dle ASTM G-65.....	75
16.	Závěr	77
	Seznam použité literatury.....	78
	Seznam obrázků	85
	Seznam Tabulek	87
	Seznam příloh	88

Použité zkratky a symboly

Ma	[-]	Machovo číslo
dB	[-]	Decibel
V	[W]	Výkon laseru
v	[mm·s ⁻¹]	Rychlost posuvu laserového svazku
K	[mm ³ ·N ⁻¹ ·m ⁻¹]	Koeficient abrazivního tření
W	[mm ³ ·m ⁻¹]	Rychlost opotřebení
W_t	[%]	Objemové procento prvkového složení
E_h	[W·mm ⁻²]	Energetická hustota
E_z	[keV]	Energie záření
V_h	[J·mm ⁻²]	Výkonová hustota
ϑ	[Hz]	Frekvence elektromagnetického záření
E_g	[J, eV]	Šířka zakázaného pásu
I_p	[mA]	Prahový proud
P_e	[mW]	Emitovaný optický výkon
θ	[°]	Difrakční úhel

APS (Atmospheric Plasma Spray)	-	Plazmatický nástřik v atmosféře
ASTM (American Society for Testing and Materials)	-	Americká společnost pro testování a materiály
BSE (Backscattered Electrons)	-	Zpětně odražené elektrony
CBN (Cubic Boron Nitride)	-	Kubický nitrid bóru
CGS (Cold gas spray)	-	Nástřik za studena
COF (Coefficient Of Friction)	-	Koeficient tření
CW (Continuous Wave)	-	Kontinuální vlny
D-Gun (Detonation Gun)	-	Detonační nástřik
EDX (Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy)	-	Energiově disperzní X-ray analýza
FS (Flame spraying)	-	Nástřik plamenem
HA (Hydroxyapatit)	-	
HIP (Hot Isostatic Pressing)	-	Izostatické lisování za tepla
HPDD (High Power Direct Diode)	-	Vysokovýkonný diodový laser
HRC (Rockwell Scale)	-	Tvrdost podle Rockwella

HV (Vicker Hardness)	-	Tvrдость podle Vickerse
HVAF (High Velocity Air Fuel)	-	Vysokorychlostní nástřik plamenem s využitím kyslíku
HVOF (High Velocity Oxygen Fuel)	-	Vysokorychlostní nástřik plamenem s využitím vzduchu
LASER (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation)	-	Zesilování světla stimulovanou emisí záření
LPPS (Low Pressure Plasma Spray)	-	Plazmatický nástřik při nízkém tlaku
LPVD (Laser Physical Vapor Deposition)	-	Laserem asistovaná fyzikální depozice z plynné fáze
MASER (Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation)	-	Zesilování mikrovln stimulovanou emisí záření
Nd:YAG (Neodym yttrium aluminium granat)	-	
PACVD (Plasma Assisted Chemical Vapor Deposition)	-	Plazmou asistovaná chemická depozice z plynné fáze
PECVD (Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition)	-	Plazmou zdokonalená chemická depozice z plynné fáze
PN	-	Přechod mezi polovodiči typu P a N
PTA (Plasma Transferred Arc)	-	Plazmové navařování
PVD (Physical Vapour Deposition)	-	Fyzikální depozice z plynné fáze
RPM (Revolution per minute)	-	Otáčky za minutu
SEM (Scanning Electron Microscope)	-	Rastrovací elektronový mikroskop
SPS (Spark Plasma Sintering)	-	Elektrické jiskrové spékání
TEA (Transversely Excited Atmospheric)	-	Transverzálně excitované atmosférické
TWAS (Twin Wire Arc Spray)	-	Nástřik elektrickým obloukem
VPS (Vacuum Plasma Spray)	-	Plazmatický nástřik ve vakuu
XRD (X-Ray Diffraction)	-	Rentgenová difrakce

Úvod

Významnou skupinou technologií depozice ochranných povlaků je tzv. žárový nástřík. Technologie žárového nástříku využívají jako zdroj energie různé typy hořáků, založené na principu spalování (nástřík plamenem, HVOF nástřík) či elektrické energie (plazmatický nástřík, nástřík elektrickým obloukem). HVOF metoda využívá k vytvoření nástříku vysokorychlostní proud spalin. HVOF žárový nástřík je částicový proces, při kterém se do plamene v hořáku přivádí přídatný materiál ve formě prášku nebo drátu, a následně dochází k jeho natažení a urychlení směrem k povlakované součásti. Po dopadu částic na povrch součásti dochází k jejich plošnému rozprostření a rychlému zchladnutí. Výsledná struktura povlaku je lamelární a vyniká specifickými mechanickými a fyzikálními vlastnostmi. Takto vytvořené povlaky dosahují tlouštěk od 40 μm do několika milimetrů [1].

Technologie HVOF se využívá hlavně pro nástřík povlaků na bázi kovových slitin a cermetů, a to zejména pro dosažení malé pórovitosti, výborné adheze k podkladovému materiálu a nízkému podílu oxidů. Výsledné povlaky jsou, dle použitého materiálu, odolné proti korozi, oxidaci za zvýšených teplot či proti opotřebení. Díky těmto vlastnostem se využívají v celé řadě průmyslových aplikací, jako např. v automobilovém průmyslu (pístní kroužky, vrtání válců), leteckém průmyslu (lopatky turbínových motorů a kompresorů), energetickém průmyslu (plynové turbíny, trysky), textilním průmyslu (lisovací válce, vodítka pro závity), zdravotním průmyslu (biomedicínské inženýrství, povlaky kyčelních kloubů) apod. [2,3,4].

Přestože metoda HVOF nabízí ve srovnání s jinými metodami žárového nástříku možnost nanášet povlaky s nízkou pórovitostí a vysokou mírou adhezní/kohezní pevnosti, je i zde potenciál ke zvýšení funkčních vlastností povlaků pomocí následného zpracování.

Modifikace povrchu laserovými technologiemi jsou techniky, které mají velký potenciál zlepšit vlastnosti daného povlaku. Laserové přetavení nebo laserové kalení umožňuje kontrolovat hloubku tepelného ovlivnění, a tím pomáhá snížit teplotní gradient oproti jiným technologiím (pecní zařízení, plamen, indukční ohřev, ...) Laserové procesy jsou nekontaktní, vhodné pro komplikované tvary a lehce automatizovatelné [5].

Tato diplomová práce se zabývá změnami mikrostruktury, mechanických a tribologických vlastností žárově stříkaného povlaku na bázi cermetu $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-}25\%\text{CoNiCrAlY}$ vlivem tepelného ovlivnění pomocí vysokovýkonného diodového laseru. Povlak $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-}25\%\text{CoNiCrAlY}$ patří do skupiny HVOF povlaků, využívajících kombinaci karbidu na bázi chromu s různými typy matic. Vhodná volba matrice umožňuje použití povlaků na bázi CrC i u vysokoteplotních aplikací.

Doposud nejvíce používaným zástupcem této skupiny je povlak z materiálu $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$, který byl předmětem mnoha studií [6,7,8,9,10,11,12,13,14,15,16,17]. Nicméně v posledních letech se v praxi začínají uplatňovat i povlaky využívající další typy materiálu matrice, např. CoNiCrAlY či NiCrMoNb . Ačkoli jejich použití by mělo vést ke zlepšeným vlastnostem, např. k vyšší odolnosti proti oxidaci za vysokých teplot nebo lepším kluzným vlastnostem, existuje prozatím poměrně málo prací, zabývajících se jejich vlastnostmi.

Potenciál aplikace laserového přetavení povrchu na vlastnosti žárového nástříku byl doposud hodnocen zejména pro povlaky na bázi slitin. Existují i první studie týkající se povlaků na bázi cermetů, avšak pouze malá část se zabývá povlakem $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-CoNiCrAlY}$.

Hlavním cílem této práce je prohloubit poznání týkající se souvislosti mikrostruktury a tribologických charakteristik doposud ne zcela probádaného materiálu $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-}25\%\text{CoNiCrAlY}$ a zejména ověřit potenciál laserového tepelného zpracování ke zlepšení funkčních vlastností tohoto povlaku.

1. Laser

V padesátých letech dvacátého století byl položen základ novému oboru – kvantové elektronice. Byla sestrojena zařízení generující a zesilující elektromagnetické záření na principu stimulované emise záření. První sestrojené přístroje byly označeny jako MASER, což značí akronymum z anglického: „Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation“. V českém překladu pak: „Zesilování mikrovln stimulovanou emisí záření.“ O několik let později byly zkonstruovány zařízení zesilující a generující na obdobném principu záření z optické spektrální oblasti. Toto zařízení bylo označeno jako LASER (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation – Zesilování světla stimulovanou emisí záření) [18].

Podle definice je laser kvantový generátor a zesilovač koherentního¹ optického záření s extrémní monochromaticností², nízkou rozbíhavostí (divergencí) svazku a vysokou hustotou přenášeného výkonu a energie. Žádné jiné záření, než záření generované pomocí laseru, nemá tyto vlastnosti [5,19].

1.1. Princip laseru

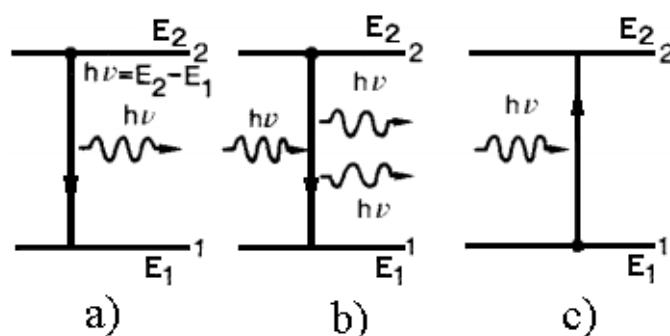
Navzdory tomu, že existuje velké množství laserových generátorů, lze prohlásit, že každý laserový generátor se skládá ze tří základních částí:

- Laserové aktivní prostředí – zesilování záření
- Zdroj čerpání pro excitaci aktivního prostředí
- Rezonátor – zpětná vazba mezi zářením a aktivním prostředím (laserové oscilace)

Základní význam pro funkci laseru má proces stimulované emise, který je znázorněn na Obr. 1. Tento jev nastává při interakci excitovaného kvantového systému (atomu, iontu nebo molekuly) s elektromagnetickým zářením – fotonem, jehož frekvence ν odpovídá energetickému rozdílu $E_2 - E_1$ mezi excitovaným a některým níže položeným stavem kvantového systému. Přitom dochází k přechodu kvantového systému do tohoto energeticky chudšího stavu a současně je excitační energie uvolněna emitováním fotonu s energií

$$h\nu = E_2 - E_1, \quad (1)$$

kde $h = 6,626070040 \cdot 10^{-34}$ [J · s] je Planckova konstanta. Podstatné je, že i ostatní vlastnosti emitovaného fotonu jsou stejné jako u fotonu, který emisi stimuloval. Toto je podstatou zesilování světla [5,19,20,21].



Obr. 1 - Schematické znázornění tří procesů: a) - spontánní emise, b) - stimulovaná emise, c) - absorpce [20].

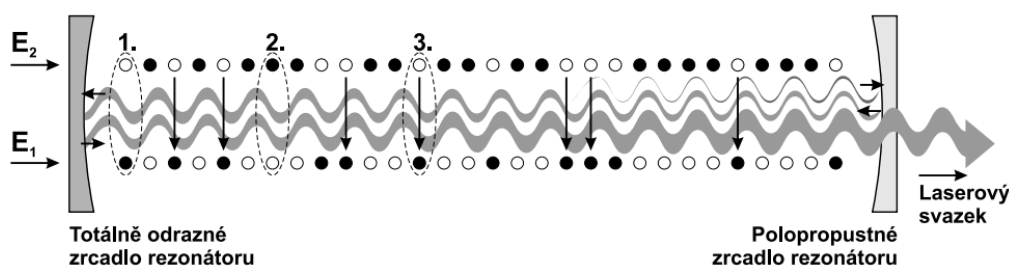
¹ Vnitřně uspořádaného, sfázovaného.

² Všechny fotony mají stejnou vlnovou délku a frekvenci, tzn., že záření má stejnou barvu.

Obecný princip laseru je následující: zdroj budící energie zajišťuje, aby se v aktivním prostředí nacházel dostatek kvantových soustav v excitovaném stavu. Poté, co některá kvantová soustava aktivního prostředí přejde náhodně spontánní emisí na nižší hladinu, bude uvolněné kvantum stimulovat i další kvantové soustavy k přechodu na spodní energetickou hladinu a emisi fotonů. Část fotonů se může kvantovými soustavami opět absorbovat. Pokud však bude v aktivním prostředí více kvantových soustav v excitovaném stavu (inverze populace hladin) bude se optické záření řetězovou reakcí zesilovat [5,19].

Spontánní emise se stane zanedbatelnou vzhledem k emisi stimulované a generované záření nabude jednotné povahy, tj. bude koherentní a monochromatické. Aby se zajistila směrovost laserového záření, formuje se aktivní prostředí do tvaru dlouhého válce a je umístěno uvnitř optického rezonátoru. Ten zajišťuje selektivní kladnou zpětnou vazbu systému – jen rezonující fotony se budou zesilovat. Její velikost lze nastavit tak, aby byla maximální pro laserový paprsek požadovaných vlastností. Po dostatečném zesílení je laserový svazek z rezonátoru vyveden, viz Obr. 2 [5,19].

Pokud je aktivní prostředí s inverzním obsazením hladin uzavřeno v optickém rezonátoru (tvořeném obvykle dvěma navzájem proti sobě umístěnými rovinnými nebo také sférickými zrcadly), zpětná vazba laserového záření (odraz zpět do aktivního prostředí) umožní vznik generátoru elektromagnetických kmitů. Překročí-li zesílení světla v aktivním prostředí ztráty při jednom průchodu mezi zrcadly, začne laser emitovat záření na vlnové délce charakteristické pro dané aktivní laserové prostředí. Aby bylo možné vyvést laserový paprsek z rezonátoru, je jedno ze zrcadel částečně propustné. Na Obr. 2 jsou vyznačeny kvantové soustavy v základním (1.) a v excitovaném (2.) stavu, stimulovaná emise (3.) a energetické hladiny kvantových soustav E_1 a E_2 [19].



Obr. 2 - Princip laseru [19].

Laserové záření se odlišuje od záření běžných světelných zdrojů (plynové výbojky, zářivky) následujícími vlastnostmi:

- Záření je prostorově koherentní (vlny emitované z různých míst aktivního prostředí mají pevný fázový vztah [5,19].
- Záření se v prostoru nešíří všemi směry, ale v úzkém svazku [19].
- Laser emituje postupné vlnění se zanedbatelnými fázovými nestabilitami – laserové záření je časově koherentní. S tím je svázaná vysoká přesnost frekvence záření. Frekvence kmitání viditelného světla je řádově 10^{15} Hz, typická frekvenční šířka laseru se pohybuje od 10^8 do 10^9 Hz [19].
- Laser umožňuje generovat extrémně krátké světelné impulsy. Při použití pulsního laseru lze v úzké oblasti vlnových délek uvolnit optický výkon o hodnotách $10^{10} - 10^{13}$ W. Vysoká intenzita elektrického pole v takovém laserovém paprsku vedla k odhalení zcela nových fyzikálních efektů interakce světla a hmoty (nelineární optika) [5,19].

1.2. Typy laserů

Existuje mnoho různých tříd laseru. Jejich princip je stejný, ale liší se konstrukcí a realizací jednotlivých částí. Základní rozdělení typů laseru vypadá následovně [5,19]:

- Podle skupenství aktivního prostředí
 - Pevnolátkové
 - Kapalinové
 - Plynové
 - Plazmatické
 - Polovodičové (laserové diody)
- Podle režimu generace
 - Kontinuální lasery (CW)
 - Pulsní lasery
 - Lasery pracující v režimu volné generace³
 - Lasery pracující v režimu spínání zisku⁴
 - Lasery pracující v režimu synchronizace módů⁵
- Podle způsobu čerpání (koherentně nebo nekoherentně)
 - Opticky
 - Elektrickým výbojem
 - Chemickou reakcí
 - Elektronovým svazkem
- Podle frekvenční oblasti
 - Submilimetrové
 - Infračervené
 - Viditelné
 - Ultrafialové
 - Rentgenové
- Podle prostorové struktury
 - Jednomódové
 - Mnohamódové
- Podle rozsahu generovaných frekvencí
 - Jednofrekvenční
 - Přeladitelné

³ Délka impulsů řádově 10^{-4} s.

⁴ Často označované jako Q-spínání. Délka impulsů řádově 10^{-8} s

⁵ Délka impulsů řádově 10^{-12} s.

- Podle využitých nelineárních jevů
 - Lasery generující na vyšší harmonické frekvenci
 - Lasery se směřováním frekvencí
 - Ramanovské lasery⁶

Výše popsané rozdělení se neustále mění a doplňuje díky novým technologiím a realizaci nových laserů, proto je rozdělení podle skupenství aktivního prostředí nejpoužívanější [5].

1.2.1. Pevnolátkové lasery

Do této skupiny laserů lze zařadit všechny lasery, jejichž aktivní prostředí se nachází v pevném stavu. Jedná se o opticky čerpané pevnolátkové iontové lasery, jejichž aktivní prostředí tvoří matrice – krystalické nebo amorfní (sklo, keramika) izolanty, dotované příměsí vhodných iontů. Nejznámější představitel této skupiny je červeně zářící rubínový laser, jehož aktivní prostředí tvoří safír dopovaný chrom-rubínem. Nejrozšířenějším a dnes asi nejlépe technicky zvládnutým pevnolátkovým laserem je laser označovaný jako Nd:YAG [5].

1.2.2. Kapalinové lasery

Aktivní prostředí tvoří opticky buzené roztoky organických barviv. Pomocí několika typů barviv a využitím metod nelineární optiky lze prakticky spojitě pokrýt pásmo vlnových délek od 300 nm do 1500 nm. Typickým představitelem je rhodamonový laser generující pulsní záření od zelené až po červenou oblast spektra [5].

1.2.3. Plynové lasery

Aktivní prostředí plynových laserů tvoří atomy (He-Ne laser), ionty (Ar laser), molekuly (CO₂ laser) či jejich směsi v plynné fázi, přičemž inverze obsazení nastává mezi energetickými hladinami některé složky. Nejznámějším, donedávna nejrozšířenějším a zároveň prvním vyrobeným plynovým laserem, je červeně zářící atomární He-Ne laser. V průmyslu a medicíně je však nejvíce používán CO₂ laser generující na vlnové délce 10 μm. Pro různé světelné efekty, nebo také pro separaci iontů se často používá zeleně a modře zářící Ar laser [5].

1.2.4. Polovodičové lasery

V současné době jde o nejrozšířenější lasery. Často se pro ně používá označení laserová dioda. Od ostatních laserů se liší tím, že nepracují s přechodem elektronů mezi diskrétními hladinami, nýbrž se u nich vyskytují elektronové přechody mezi vodivostním a valenčním pásem polovodiče. Polovodičové lasery mají velmi malé rozměry, což má za následek větší divergenci výstupního svazku oproti jiným laserům. Kromě toho jsou velmi citlivé na změnu teploty [5].

1.2.4.1. Princip funkce laserových diod

Základem funkce všech laserů je proces stimulované emise (popsáno v kap. 1.1). Na rozdíl od jiných typů laserů jsou u polovodičových krystalů aktivní atomy hustě vedle sebe a záření se neuskutečňuje mezi diskrétními energetickými hladinami, nýbrž mezi energetickými pásy [6].

Nejnižší energetické hladiny jsou obsazovány elektrony ve vodivostním pásmu až po Fermiho kvazihladinu pro elektrony E_{fn} . Do Fermiho kvazihladiny pro díry E_{fp} jsou stavy ve valenčním pásmu bez elektronů. Pokud foton dopadá na polovodič, který má energii větší než E_g (šířka

⁶ Tento druh laseru využívá tzv. Ramanův jev (nebo též Ramanův rozptyl), kdy dochází k neelastické srážce fotonu s molekulou.

zakázaného pásu), avšak menší než rozdíl Fermiho kvazihladin $E_{fn} - E_{fp}$, nemůže dojít k jejich absorpci (hladiny jsou již obsazeny).

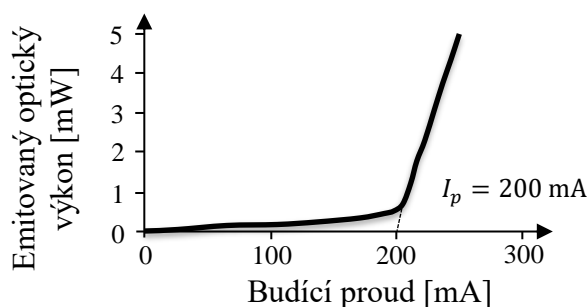
Fotony tak stimulují přechody elektronů z vodivostního do valenčního pásu. Podmínka pro jejich stimulaci je:

$$E_g < h\nu < E_{fn} - E_{fp} \quad (2)$$

Aktivní prostředí v „injekčních“ polovodičových laserech (laserové diody čerpané elektrickým proudem) vzniká při injekci elektronů a děr z přechodu PN nebo z heteropřechodu. Ke generování optického záření pak dochází v důsledku zavedení kladné zpětné vazby, která část zesíleného signálu z výstupu přivádí na vstup [5,22].

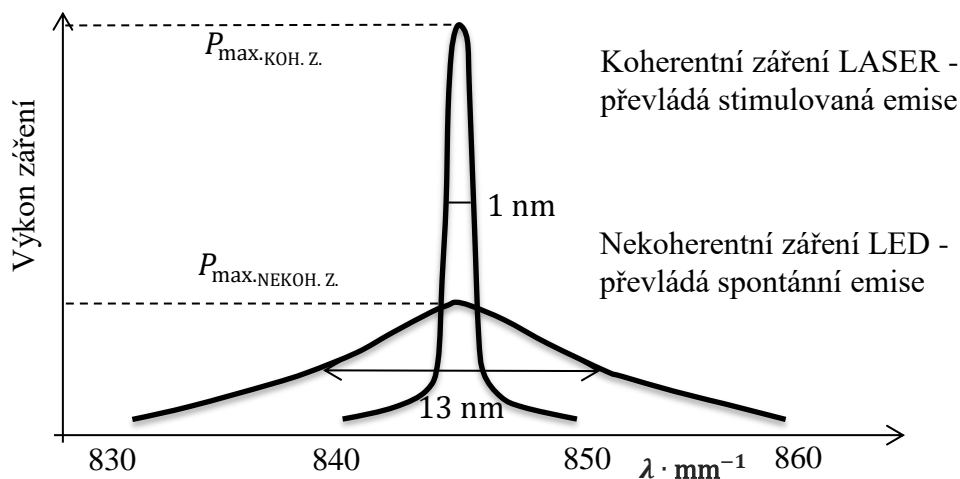
Spontánní záření je generováno při nízkých proudech tekoucích přes přechod PN v přímém směru. Toto záření se šíří ve všech směrech s náhodnou fází. Růst proudu zvyšuje hustotu fotonového toku. Pokud roste intenzita vyzařování nelineárně, nazývá se tento proces superluminescence. Pokud se stimulované záření rovná ztrátám a záření se stává koherentní, dochází k tzv. laserovému režimu. Koherence je dosažena použitím optického rezonátoru [5,22].

Přechod mezi spontánní a stimulovanou emisí se nazývá práh. U polovodičových laserů se určuje prahový proud I_p a laserová dioda při něm přechází z režimu nekoherentního zdroje do režimu laseru, viz Obr. 3 [5,22].



Obr. 3 - Závislost emitovaného optického výkonu na budícím proudu [22].

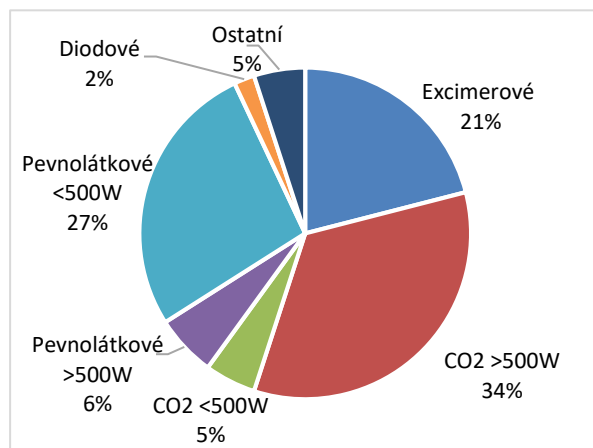
Pro malé proudy má záření spontánní charakter a je lineární funkcí budícího proudu. Po dosažení prahového proudu prudce narůstá výkon stimulovaného záření a ze zrcadel rezonátoru je emitováno koherentní záření. Zároveň také dochází ke kvalitativní změně tvaru vyzařovací charakteristiky laserové diody, viz Obr. 4 [22].



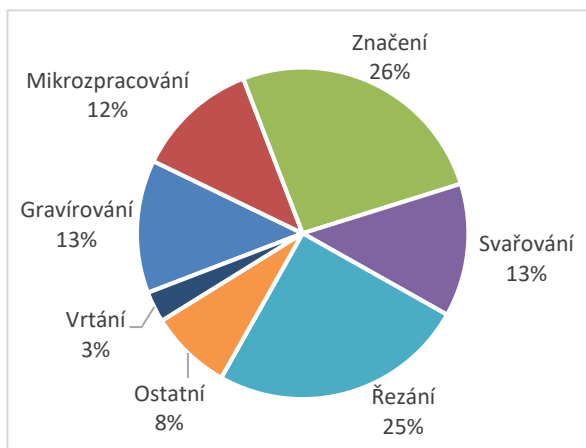
Obr. 4 - Porovnání šířky pásma emitovaného záření při spontánní stimulované emisí [22].

1.3. Průmyslové využití laserových technologií

Díky schopnosti laserového svazku být fokusován na velmi malou plochu je laser zdrojem záření s vysokou plošnou hustotou výkonu. Na laserové technologie v průmyslu jsou kladeny nemalé požadavky – schopnost odolávat pracovnímu prostředí, vícesměnný provoz a malé požadavky na údržbu a servis. V průmyslu jsou laserové technologie používány k vrtání, řezání, svařování, úpravě povrchů materiálu, gravírování, značení nebo mikrozpracování díky vysoké kvalitě opracování bez mechanického kontaktu, rychlosti, přesnosti a flexibilitě. Jednotlivá zastoupení laserových technologií a průmyslových aplikací jsou znázorněna na Obr. 5 a 6 [23,24,25].



Obr. 5 – Zastoupení laserových technologií v průmyslu [23,24].



Obr. 6 – Zastoupení průmyslových aplikací při využití laserových technologií [23,24].

Pro laserové kalení se nejčastěji používají CO₂, Nd:YAG a diodové lasery. K zakalení je obvykle potřeba 50 J na 1 mm³, což odpovídá výkonové hustotě laserového svazku 10³ W·cm⁻² a interakci laserového svazku s povrchem materiálu přibližně 1 s. Výkon těchto laserových technologií pro kalení se pohybuje od 1 do 3 kW. U diodových laserů je nejčastěji využíván obdélníkový průřez paprsku (10 × 10, 15 × 15, 15 × 30 mm²...), posuvová rychlost 120 – 600 mm·min⁻¹, výkon laseru 3 – 6 kW a výkonová hustota laserového svazku 10³ – 10⁴ W·cm⁻² [26,27].

Při laserovém řezání jsou nejvíce využívány CO₂ lasery, zejména pro řezání rovinných ploch. Nd:YAG a portálové diodové lasery se naopak používají pro řezání složitějších 3D tvarů. Výkonová hustota laserového svazku se pohybuje okolo 10⁴ W·cm⁻² pro kovy, oceli nebo termoplasty a 10⁶ W·cm⁻² pro některá skla, keramiku či kompozity. U CO₂ laseru o výkonu 1,5 kW je možné řezat nízkolegovanou ocel o tloušťce 1 mm rychlostí 10 m·min⁻¹ nebo tloušťku 10 mm rychlostí 1 m·min⁻¹ [27].

Pro značení a gravírování neželezných materiálů se nejčastěji používá pulzní TEA CO₂ laser o výkonu 50 – 100 W, pulzní době 1 – 2 μs a energii 1 – 20 J·cm⁻². K popisu kovových materiálů se používají kontinuální diodou čerpané Nd:YAG lasery s hustotou výkonu 25 W·cm⁻² a vysokou kvalitou svazku. Popisovací rychlost dosahuje v závislosti na druhu materiálu až 4 000 mm·s⁻¹ s přesností 0,002 mm [25,26,27,28].

V současné době jsou hojně využívány tzv. laserové mikrotechnologie (mikrořezání, mikronavařování, ...) využívající pikosekundové lasery. Střední výkon těchto laserů se pohybuje okolo 100 W při vlnové délce 1030 nm pro infračervenou oblast spektra a 60 W při vlnové délce 515 nm pro zelenou oblast spektra. Vedení laserového paprsku probíhá ve vodním

paprsku vlivem totálního odrazu. Rychlost předávání energie (foton-elektron, elektron-elektron, elektron-mřížka) se pohybuje v řádu piko a femto sekund.

Pro vrtání se používají pulzní lasery s vysokou amplitudou výkonu, které odstraňují jednu vrstvu materiálu za druhou až do vytvoření požadovaného otvoru. Výhodou vrtání pomocí laseru je možnost vytvoření otvorů již od průměru 10 – 100 μm . Pro vrtání kovových materiálů jsou využívány zejména Nd:YAG lasery o výkonu 100 – 500 W s minimální velikostí spotu 40 μm a výkonové hustotě laserového svazku $10^6 - 10^7 \text{ W}\cdot\text{cm}^{-2}$ [24,27].

Pro navařování větších rovinných ploch o tloušťce několika milimetrů se nejčastěji používá CO_2 laserových technologií. Pro navařování složitějších 3D tvarů o tloušťce do 1 mm se používají robotizované diodové pulzní lasery nebo Nd:YAG laserové technologie. V praxi se používají laserové technologie o minimálním výkonu 2 kW s výkonovou hustotou laserového svazku $10^4 \text{ W}\cdot\text{cm}^{-2}$ a interakcí laserového paprsku 100 ms s povrchem součásti. Frekvenční šířka laseru se pohybuje od 10^3 do 10^4 Hz [26,27].

2. Modifikace povrchu laserem

Modifikací povrchu laserem se rozumí změna složení povrchové vrstvy materiálu nebo její mikrostruktury za účelem zlepšení mechanických, fyzikálních nebo technologických vlastností. V praxi se nejvíce využívá laserové kalení povrchu pro zvýšení odolnosti proti opotřebení, nebo odstranění zbytkových napětí v povrchové vrstvě pro zvýšení odolnosti proti únavě materiálu [29].

Obecně lze modifikace povrchu laserem rozdělit na:

- Tepelné zpracování povrchu laserem – laserové kalení (Laser surface heat treatment – laser hardening)
- Laserové přetavení (Laser surface melting)
- Depozice materiálu pomocí laseru (Laser metal direct deposition)
 - Laserové navařování (Laser cladding)
 - Legování povrchu (Laser alloying)
 - Vytvrzení vrstvy pomocí laseru (Laser hard coating)
- Laserem asistovaná fyzikální depozice z plynné fáze (LPVD)
- Vytvrzení povrchové vrstvy materiálu rázovou vlnou (Laser shock peening)

2.1. Tepelné zpracování povrchu laserem – laserové kalení⁷

Základem laserového kalení je vystavení povrchu materiálu tepelnému cyklu – ohřev a ochlazení. Při ohřevu nedochází k roztavení materiálu, transformace se proto vyskytuje pouze v pevném stavu. Rychlost ochlazování⁸ může dosahovat až $10^7 \text{ }^\circ\text{C}\cdot\text{s}^{-1}$, což má za následek velmi krátkou dobu austenitizace (0,01 – 1,0 s). Velmi krátká austenitizační doba znemožňuje plnou homogenizaci austenitu, a tím je omezeno plné využití výhod legovaných ocelí při přeměnách austenitu i dosažení plné hodnoty tvrdosti a jakosti po kalení [29,30].

⁷ Tato část popisuje laserové kalení ocelí (v praxi nejpožívanější). Rovněž lze vytvrzovat také např. slitiny hliníku, kde je proces vytvrzení založen na precipitačním zpevnění. Aby došlo k precipitačnímu zpevnění, musí mít slitina změnu rozpustnosti v tuhém stavu.

⁸ Pro porovnání např. rychlost ochlazování při obloukovém svařování: $300 \text{ }^\circ\text{C}\cdot\text{s}^{-1}$ [29].

2.2. Laserové přetavení

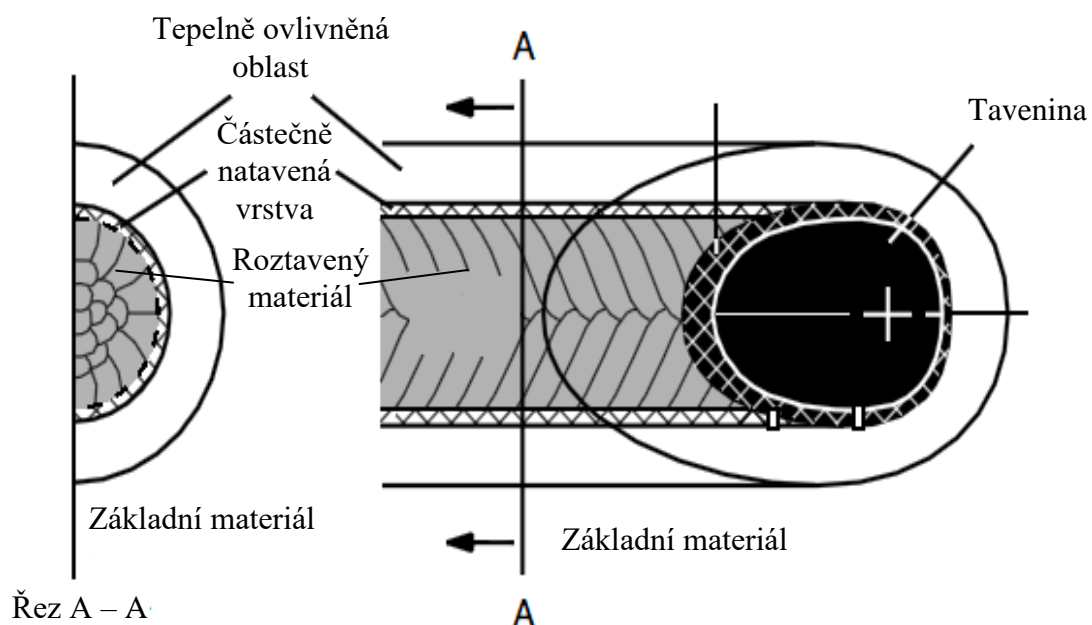
Oceli s vyšším obsahem karbidů nebo grafitu (převážně nízkouhlíkové oceli) jsou obecně těžko zpracovatelné transformacemi v tuhém stavu. Proto je vhodné ocel roztavit – difúze uhlíku je v roztaveném kovu mnohem rychlejší [29].

Základem laserového přetavení je roztavení slabé vrstvy materiálu a následná rychlá transformace do tuhého stavu (tuhnutí). Princip je velmi podobný odporovému svařování, ovšem bez přidání přídavného materiálu [29].

Energie laserového svazku je vyšší než u laserového kalení, aby došlo k roztavení materiálu. Výsledná mikrostruktura se liší od mikrostruktury základního materiálu – dochází ke zjemnění zrn. Povrch materiálu má lepší odolnost proti opotřebení, vyšší tvrdost, ale může být náchylnější ke korozním procesům. [29]

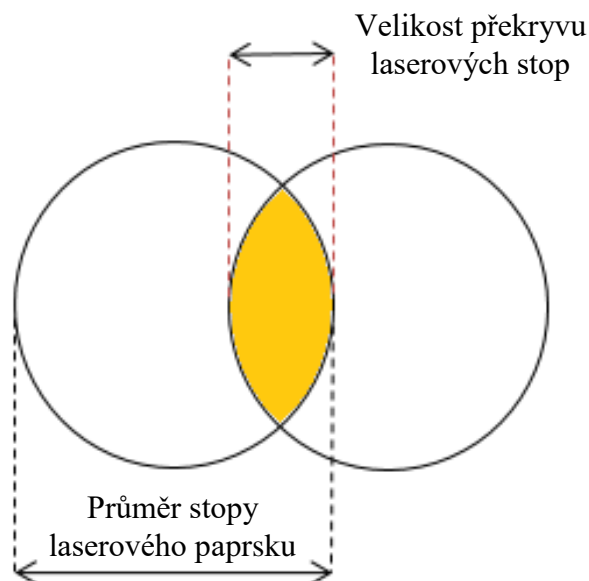
Povrch přetaveného materiálu lze popsat několika oblastmi (Obr. 7):

- Základní materiál
- Tepelně ovlivněná oblast (TOO)
- Částečně natavená vrstva
- Roztavený materiál



Obr. 7 - Struktura materiálu při laserovém přetavení [29].

Při přetavení větší plochy materiálu se laserové stopy překrývají, viz Obr. 8. Překryv je nežádoucí z důvodu snížení mikrotvrdosti, proto je snaha omezit velikost překryvu laserových stop.



Obr. 8 - Překryv jednotlivých stop laserového paprsku.

Obecně lze konstatovat, že nejvyšší tvrdost je uprostřed stopy laserového paprsku. Optimálních vlastností přetavené vrstvy lze dosáhnout vhodným nastavením procesních parametrů laseru, zejména výkonu a rychlosti pohybu laserového paprsku [29].

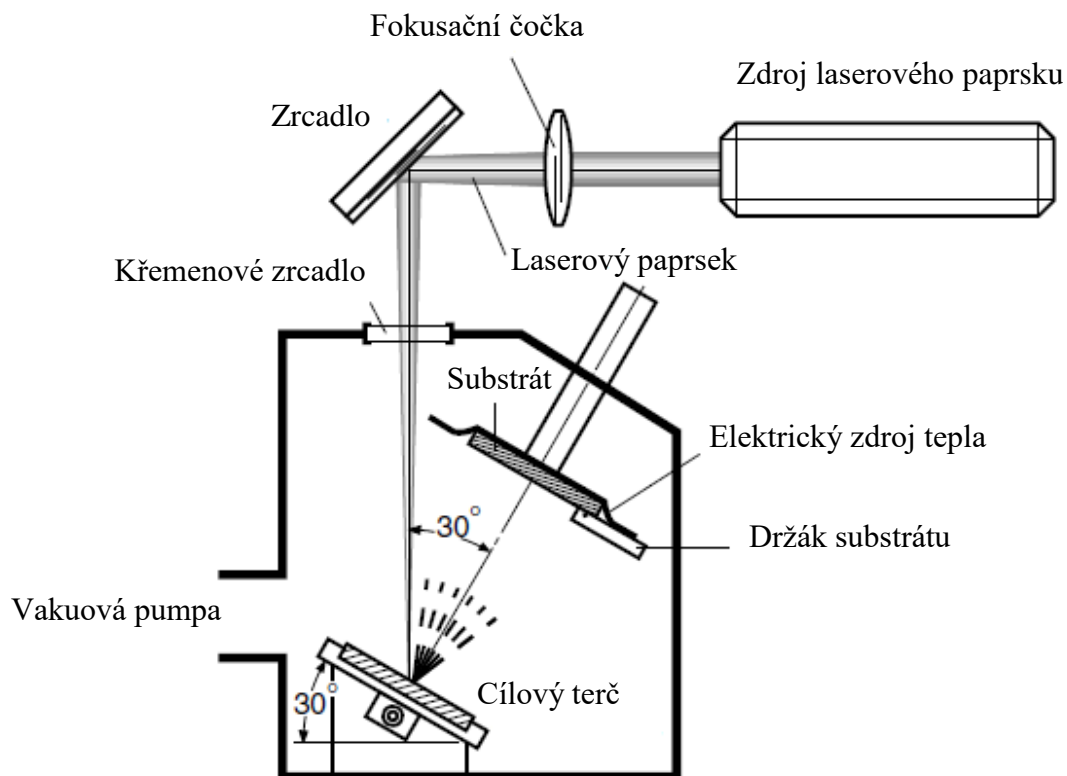
2.3. Laserové navařování

Při laserovém navařování dochází k natavení velmi malé vrstvy substrátu za současného roztavení přídavného materiálu. Přídavný materiál může být přidáván v průběhu pracovního procesu, nebo může být přítomen již před zpravováním, např. jako žárový nástřík (plasma, HVOF, plamen). Natavená vrstva by měla být co nejmenší, aby nedošlo k výraznému ovlivnění substrátu. Ovšem měla by být dostatečně velká k vytvoření silné metalurgické vazby mezi substrátem a přídavným materiálem [29].

Laserové navařování se používá pro zvýšení odolnosti proti korozi a opotřebení. Tuhnutí zkapalněného kovu může probíhat buď za vzniku amorfní struktury, nebo za vzniku nerovnovážné krystalické fáze. Při nedostatečném odvodu tepla může výsledný povrch obsahovat jemné prasklinky, které vznikají díky velkému teplotnímu gradientu. Pro zamezení těchto prasklinek je nutné součást předehřívát. Použití laserového navařování je velmi různorodé – výsledné součásti se používají v automobilovém průmyslu (sedla ventilů, vstřikovací nástroje), letectví (lopatky turbín a kompresorů), obrábění (obráběcí nástroje, pouzdra čerpadel) nebo v petrochemickém průmyslu (válce, vrtací tyče) [5,29].

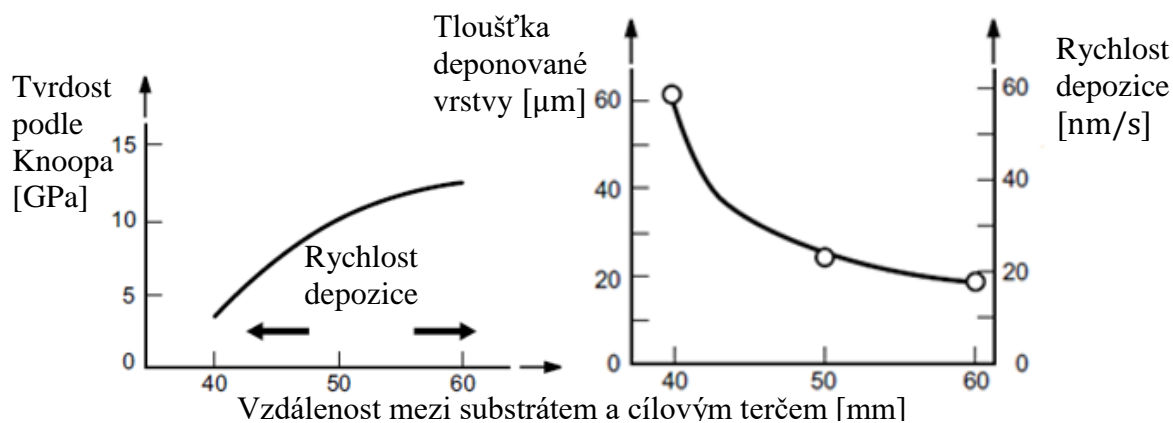
2.4. Laserem asistovaná fyzikální depozice z plynné fáze

Princip LPVD je znázorněn na Obr. 9.



Obr. 9 - Princip LPVD [29].

CW laserový paprsek dopadá na cílový terč ve vakuové komoře, který je umístěn na posuvném držáku, jenž se pohybuje určitou rychlostí. Laserový paprsek odpařuje materiál z terče, který je následně deponován na substrát. Rychlost depozice je přímo úměrná energii laserového svazku a nepřímo úměrná vzdálenosti terče od zdroje laserového paprsku, viz Obr. 10 [29].

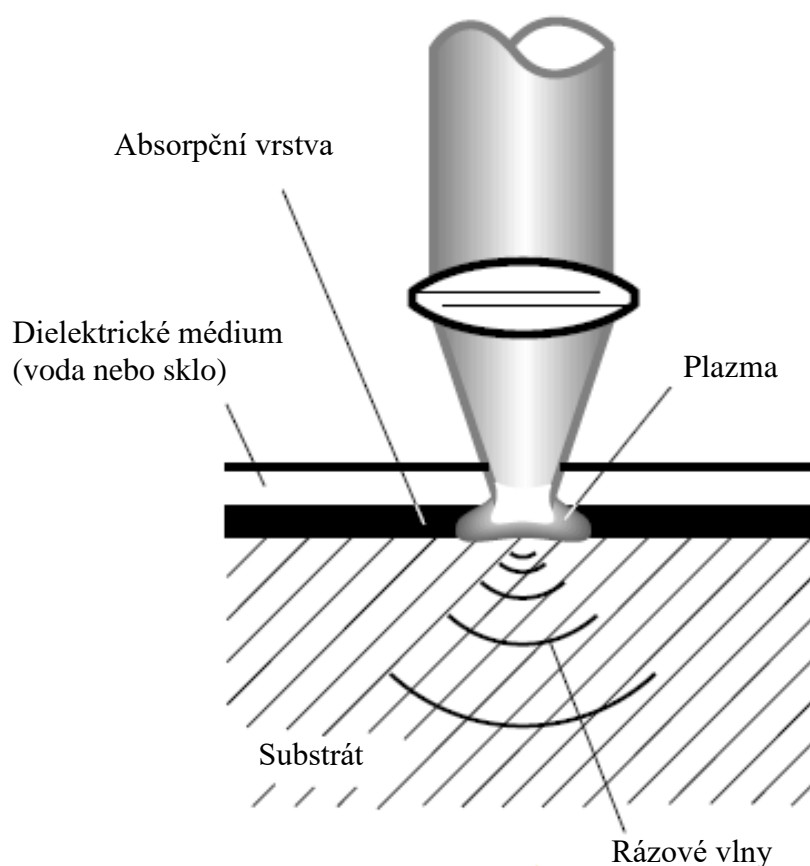


Obr. 10 - Závislost tvrdosti podle Knoop a tloušťky deponované vrstvy na vzdálenosti mezi cílovým terčem a substrátem [29].

2.5. Vytvrzení povrchové vrstvy materiálu rázovou vlnou

Vytvrzení povrchové vrstvy materiálu rázovou vlnou je proces, kdy se vnáší tlakové napětí na povrch materiálu. Zvyšuje se odolnost proti praskání a únavě materiálu. Laserový paprsek odpařuje absorpční vrstvu, která je umístěna nad dielektrickým médiem – vodou nebo sklem. Tímto vzniká plazma, jež působí velkým tlakovým napětím na povrch materiálu v důsledku zpětného rázu hybnosti odpařujícího se materiálu [29].

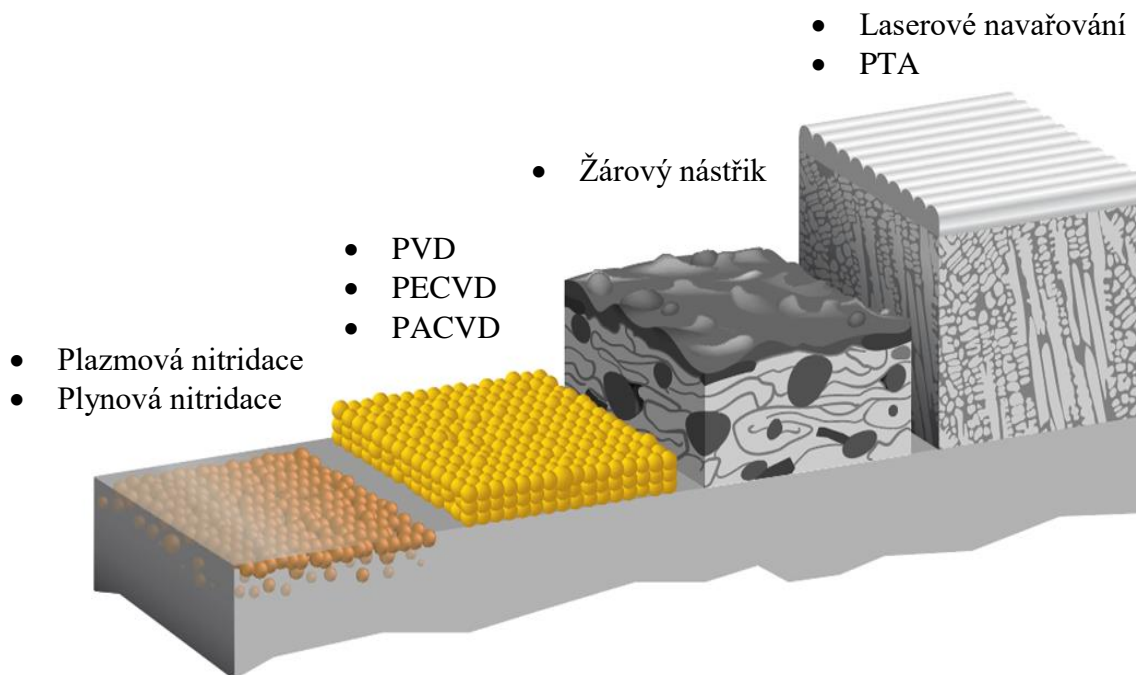
Tento proces vyžaduje laserový systém s vysokým výkonem a velkou pulzní energií pro vysokou propustnost. Samotný proces je velmi pomalý, a tedy také nákladný. Výhodnější je použití čtvercových profilů laserových svazků než profilů kruhových, kvůli vhodnějšímu rozložení tlakových napětí. Schéma vytvrzení povrchové vrstvy materiálu rázovou vlnou je znázorněno na Obr. 11 [29].



Obr. 11 - Schéma vytvrzení povrchové vrstvy materiálu rázovou vlnou [29].

3. Povlaky

Existuje celá řada metod a technologií pro vytváření povlaků, stejně jako téměř neomezený počet materiálů vhodných pro aplikaci povrchových vrstev. Pro správné nanesení povrchové vrstvy nebo povlaku je zapotřebí znát aplikaci součásti, způsob namáhání, okolní prostředí, životnost součásti, opotřebení součásti a nezdídko také zkušenost pracovníka. V Tab. 1 lze vidět v praxi nejpoužívanější typy povlaků. Na Obr. 12⁹ je znázorněna tloušťka a typ struktury u vybraných povlaků a tenkých vrstev [2,31].



Obr. 12 - Znázornění tloušťky a struktury při různých technologiích nanášení povlaků a tenkých vrstev. [31].

Tab. 1 – Rozdělení typických způsobů nanášení povlaků a jejich vlastnosti [2].

Typ povlaku	Tloušťka povlaku	Příklad materiálu povlaku
PVD	1 – 5 μm	Ti (C, N)
CVD	1 – 20 μm	Al_2O_3 , SiC
Spékané polymery	1 – 10 μm	Polymery
Žárové nástřiky	0,04 – 3 mm	Keramika, kovové slitiny
Tvrdé chromování	10 – 100 μm	Cr
Navařování	0,5 – 5 mm	Stellite, Ocel
Galvanické pokovení	1 – 5 μm	Zn
Pájení	10 – 100 μm	Ni-Cr-B-Si slitiny

⁹ Obrázek poskytl prof. Richard K. Schmid z prezentace na konferenci o žárových nástřicích (Limoges, Francie, 2015).

3.1. Žárové nástřiky

Žárový nástřik je obecný termín pro vytváření kovových nebo nekovových povlaků o tloušťce obvykle větší než 40 μm . Povlakový materiál (ve formě prášku, drátu nebo tyče) je částečně nataven pomocí tepelného zdroje. Ten může být elektrický, plazmový nebo plamenový. Natavené částice jsou urychleny směrem k povrchu buď technologickými plyny, nebo atomizačními tryskami. Díky velké kinetické energii se částice ukotvují na zdrsněném povrchu. Tím vzniká určitá vazba s povrchem substrátu a částice vytvářejí tzv. lamelární strukturu, viz Obr. 13 [32,33,34,35,36].



Obr. 13 - Snímek ze skenovacího elektronového mikroskopu. Plazmový žárový nástřik povlaku na bázi wolframu a jeho lamelární struktura [32].

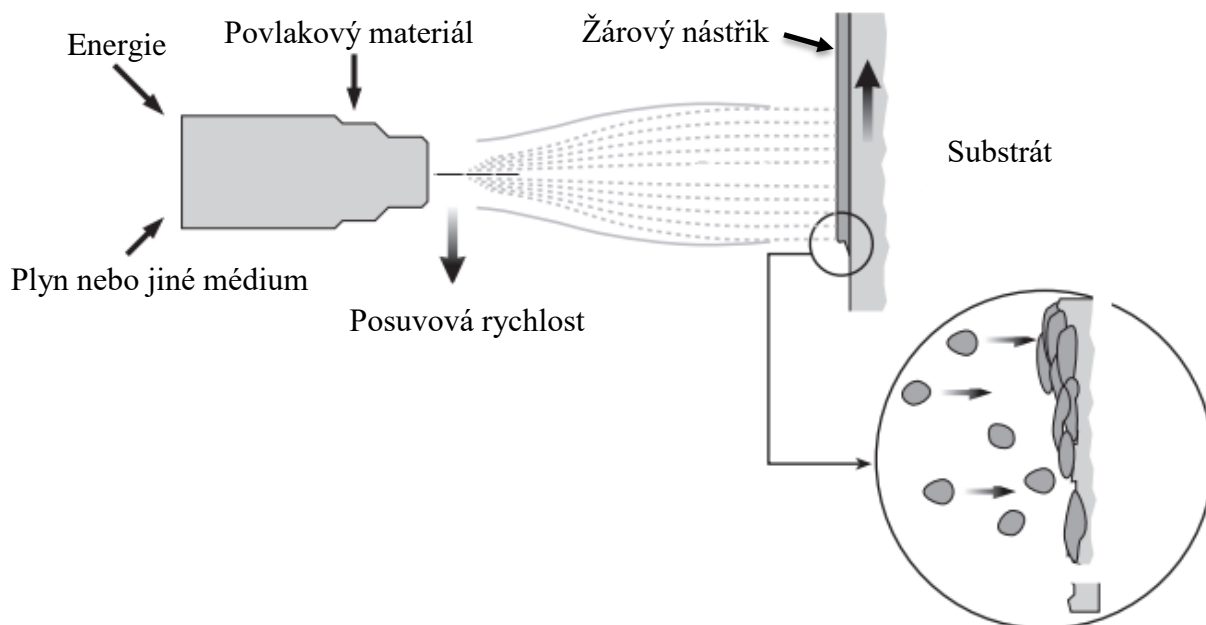
Hlavní výhodou žárových nástřiků je extrémně široká škála materiálů, které lze použít k výrobě povlaků. Prakticky se může použít jakýkoliv materiál, u kterého nedochází k rozpadu pod bodem tání. Druhou hlavní výhodou je schopnost většiny žárových nástřiků nanášet povlaky na substrát bez významného tepelného ovlivnění povrchu substrátu. Třetí výhodou je schopnost ve většině případů odstranit opotřebované nebo poškozené povlaky bez změn vlastností nebo rozměrů součástí [32].

Nevýhodou žárových nástřiků pak může být charakter technologie nanášení. Je prakticky nemožné nanést povlak na malé nebo hluboké dutiny.

Výsledná kvalita žárového nástřiku je ovlivněna celou řadou parametrů. Základní parametry jsou [6,35,37]:

- Vlastnosti prášku
 - Velikost a tvar částic
 - Nosné médium a přísun materiálu
 - Geometrie vstupu materiálu do zařízení
- Parametry zařízení
 - Zdroj energie a provozní teplota
 - Průtok paliva a pracovních plynů
 - Tvar trysky a chlazení
- Parametry při letu
 - Rychlost a teplota letících částic a plemene
 - Trajektorie letících částic
- Parametry při dopadu
 - Energie a úhel dopadu částic
 - Drsnost a teplota povrchu substrátu

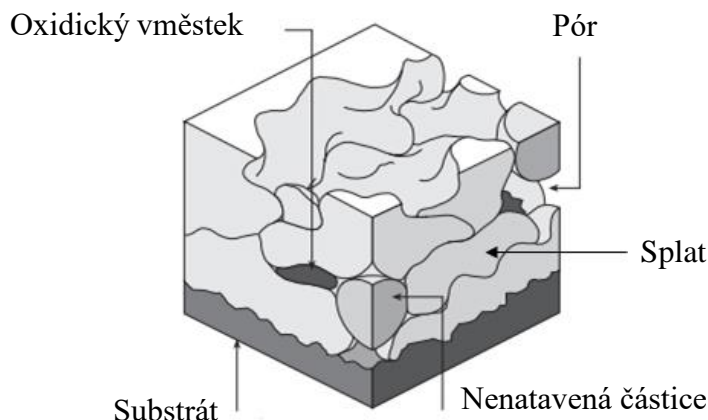
Zjednodušené schéma žárového nástřiku je znázorněno na Obr. 14.



Obr. 14 - Schéma žárového nástřiku [2].

3.1.1. Struktura žárových nástřiků

Princip žárových nástřiků vede ke vzniku lamelární struktury, jež je tvořena deformovanými částicemi (tzv. splaty), nenatavenými částicemi, póry a oxidickými vměstkami, jak je možné vidět na Obr. 15.



Obr. 15 - Zjednodušená struktura žárového nástřiku [2].

3.1.1.1. Splaty

Splat je nenatavená částice, která se při dopadu mění deformací na tvar disku. Jednotlivé splaty se navzájem překrývají a tvoří tak určitý stavební blok povlaku. Rychlost ochlazování letící částice se pohybuje v rozsahu $10^5 - 10^8$ °C/s.

3.1.1.2. Oxidické vměstky

Oxidické vměstky mohou vznikat interakcí letící částice s atmosférou, nebo vlivem gradientu teplot na povrchu substrátu. V případě oxidující částice hraje významnou roli teplota letící částice a doba letu k substrátu. Přítomnost oxidů může zvýšit tvrdost povlaku, odolnost proti opotřebení a zajistit mazivost. Oxidy mohou rovněž zvýšit odolnost proti korozi.

Oxidické vměstky by měly být rovnoměrně rozprostřeny v objemu substrátu. V opačném případě může vysoká koncentrace oxidů na jednom místě vést ke snížení kohezní pevnosti a zvýšení křehkosti povlaku. Míra oxidických vměstků se dá regulovat podmínkami nástřiku. První možností je provádět nástřik v ochranné atmosféře, která zabrání interakci kyslíku s letící částicí. Dále je možné obsah oxidů regulovat teplotou plamene, depoziční vzdáleností nástřiku nebo vhodnějším zvolením velikostí částic prášku. [6,7,38].

3.1.1.3. Póry

Dalším kritériem pro hodnocení kvality povlaků je pórovitost. Pórovitost ovlivňuje kohezní pevnost substrátu, a také naznačuje, že je v substrátu velké množství nenatavených nebo částečně nenatavených částic. Pórovitost by neměla přesahovat 5 % z objemového celku substrátu. Póry vznikají nejčastěji kolem nenatavených částic, praskáním povlaku nebo nevhodným technickým řešením (nevhodně zvolené krytování nebo úhel dopadu). Pórovitost je obecně u povlaku odolným proti opotřebení nežádoucí – dochází k předčasnému lomu nebo drolení.

Vyšší míra pórovitosti (až 40 %) je naopak velmi žádoucí v odvětví biomedicínského inženýrství – tvorby implantátů. Kostní buňky tak lépe interagují s implantátem a urychlí dobu léčení. Dalším použitím s vyšší mírou pórovitosti je například u samomazných ložisek (pórovitost 10-30 %) nebo u povlaků tepelných bariér. [6,7,32].

3.1.2. Rozdělení žárových nástřiků

Existuje celá řada způsobů, jak rozdělit žárové nástřiky. Jedním ze způsobů je rozdělení podle typu tepelného zdroje [2,6,7]:

1. Tepelná energie elektrického zdroje
 - Nástřik elektrickým obloukem (TWAS)
 - Plazmatický nástřik
 - V atmosféře (APS)
 - Ve vakuu (VPS)
 - Při nízkém tlaku (LPPS)
2. Tepelná energie chemické reakce hoření směsi paliva a kyslíku
 - Vysokorychlostní nástřik plamenem – HVOF, HVOF, ...
 - Detonační nástřik (D-Gun)
 - Nástřik plamenem (FS)
 - Nástřik za studena (CGS)

Dále je možné žárové nástřiky rozdělit podle druhu přídavného materiálu, který může být ve formě prášku, drátu nebo tyčinek. Obecné rozdělení však neexistuje z důvodu velkého množství způsobů výroby žárových nástřiků v každé technologické skupině. Jednotlivé druhy žárových nástřiků se odlišují provozní teplotou, rychlostí natavených částic, množstvím přídavného materiálu, aj. V Tab. 2 lze vidět srovnání jednotlivých druhů žárových nástřiků a jejich hlavních parametrů.

Tab. 2 - Provozní parametry a vlastnosti jednotlivých nástřiků¹⁰ [6,32,39].

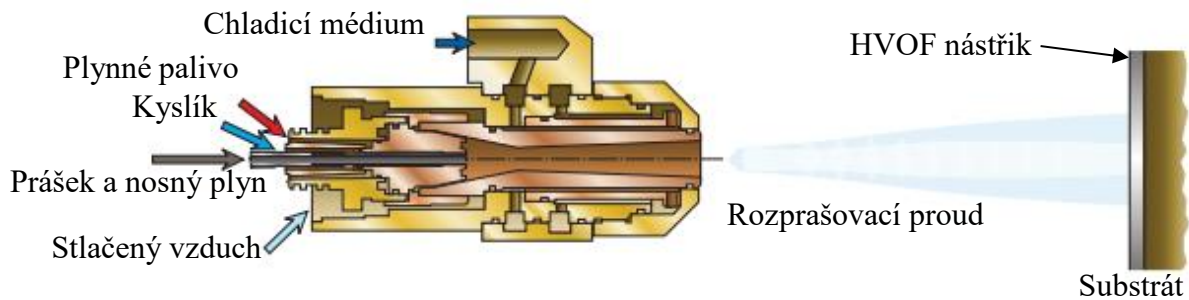
Vlastnosti	FS	APS	VPS/LPPS	TWAS	D-Gun	HVOF	CGS
Teplota plamene [°C]	3000	12000	12000	4000	3000	3000	300-1000
Rychlost částic [m/s]	40-100	150-400	150-600	100-130	500-1000	400-1000	800-1200
Přísun materiálu [g/min]	30-50	50-150	25-150	150-2000	-	15-50	80
Hustota povlaku [%]	85-90	90-95	90-99	80-95	>95	>95	>94
Adheze [MPa]	7-18	<68	>68	10-40	82	68	56-73
Míra oxidů	Vysoká	Střední	Nízká	Střední	Nízká	Nízká	Nízká

¹⁰ U detonačního nástřiku není uvedena hodnota přísunu materiálu, jelikož tento proces není kontinuální.

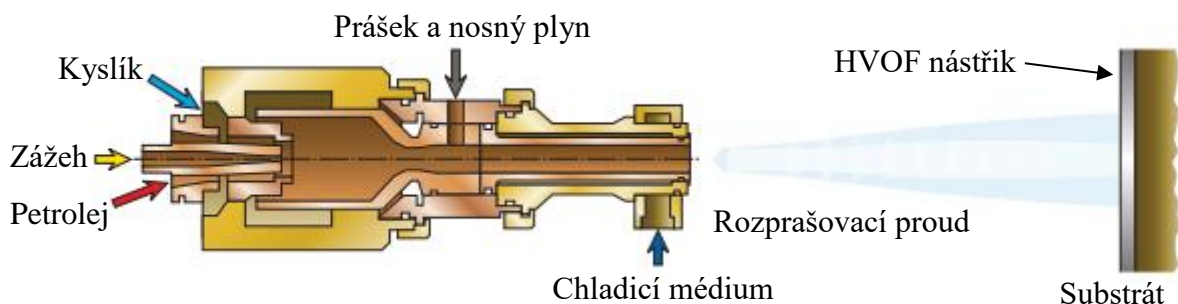
4. Vysokorychlostní nástřik plamenem (HVOF)

4.1. Princip HVOF

Při HVOF nástřiku se vytváří teplo v komoře spalování směsí kyslíku a paliva (vodík, petrolej, propan, propylen, zemní plyn, etylen nebo acetylen). Podle druhu paliva lze rozdělit stříkací pistole na plynné a kapalně, viz Obr. 16 a 17 [2,37,39,40].



Obr. 16 - HVOF stříkací pistole s plynným palivem [2].



Obr. 17 - HVOF stříkací pistole s kapalným palivem [2].

Do spalovací komory je společně s kyslíkem a palivem přiveden také přídavný materiál ve formě prášku. Spalování plynů vytváří vysokou teplotu a tlak, který dodává letícím částicím nadzvukovou rychlost. Teplota plamene se pohybuje v rozmezí 2 500 °C – 3 200 °C v závislosti na druhu paliva, poměru paliva ke kyslíku a tlaku plynu [35,39].

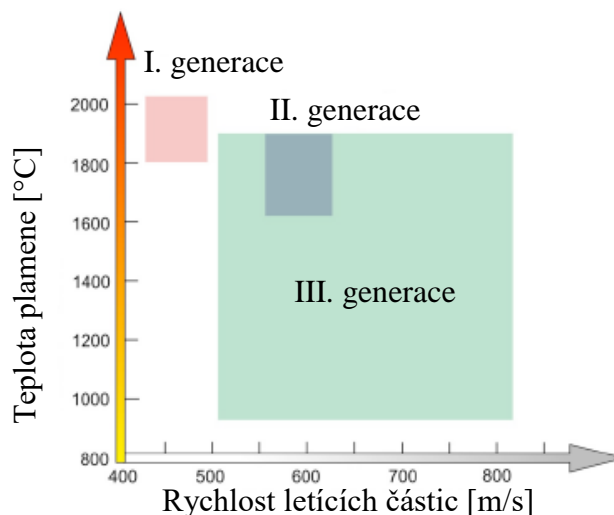
Existuje několik různých systémů HVOF s částečně odlišnými konstrukcemi. Všechny mají ale společně stejný princip – kombinaci vysokého tlaku (nad 3 bary), průtoku plynu několika set litrů za minutu a vysoké rychlosti letících částic. Všechny takové systémy lze rozdělit na 1. - 3. generaci [37,39].

V první generaci HVOF stříkacích pistolí je použita rovná tryska. Rychlost letících částic tak dosahuje maximálně rychlosti zvuku. Intenzita postřiku je přibližně 2 – 6 kg/h a výkon 80 kW.

V druhé a třetí generaci je použita Lavalova tryska¹¹. Výsledná rychlost letících částic může nabývat hodnot větších, než 1 Ma. Výkon těchto pistolí se poté pohybuje v rozmezí 100 – 300 kW, intenzita postřiku dosahuje 5 – 12 kg/h a tlak ve spalovací komoře je zhruba 2-4x

¹¹ Lavalova tryska se skládá z konvergentní a divergentní části. V konvergentní části dosáhne plyn v kritickém průřezu kritické rychlosti a dále je urychlován nadzvukovou rychlostí v části divergentní. Výsledná rychlost letících částic je větší, než 1 Ma.

větší, než u pistole první generace (3 až 5 barů oproti 8 až 20). Na Obr. 18 lze vidět postupný vývoj jednotlivých generací – vzrůstající rychlost částic a rozmezí teploty plamene [2,39].



Obr. 18 - Trend HVOF procesu napříč jednotlivými generacemi v závislosti na teplotě plamene a rychlosti letících částic [39].

4.2. Aplikace HVOF nástřiků

Vzhledem k vynikajícím vlastnostem HVOF nástřiků – tj. nízká porozita, vysoká adheze a nízký podíl oxidů – existuje celá řada aplikací napříč mnohých odvětví průmyslu, viz Tab. 3.

Tab. 3 - Aplikace HVOF nástřiků pro jednotlivá odvětví průmyslu [2,3,4,41].

Letecký průmysl	Lopatky turbínových motorů a kompresorů, ložiskové čepy, podvozek letadla, rotory vrtulníků apod.
Energetický průmysl	Plynové turbíny, lopatky Peltonovy turbíny, trysky, ventilátory
Automobilový průmysl	Pístní kroužky, vrtání válců, ojnice,
Dopravní průmysl	Hydraulické tyče, písty,
Tiskařský průmysl	Kryty tiskařských válců, desky pro tisk
Chemický průmysl	Komponenty čerpadel, uzavírací a kulové ventily, výfukové komíny, výtlačné a hydraulické tyče, šrouby dopravníků
Sklářský průmysl	Vstříkovací plunžry
Textilní průmysl	Lisovací válce, vodítka pro závity
Zpracování kovů	Vodiče pro tažení drátů, lisovací formy, střižníky plechů, válce pro válcování kovů
Těžební průmysl	Pouzdra čerpadel, hnací hřídele, plastové extrudéry, vačky, lisy
Zdravotní průmysl	Biomedicínské inženýrství, implantáty, povlaky kyčelních a kolenních kloubů ¹²

¹² Nejčastěji je využíván prášek Ti6Al4V, který se nanáší na strukturovanou nano surovinu na bázi hydroxyapatitu Ca₅(PO₄)₃(OH) při teplotě 1700 – 2000 °C a rychlosti 600 – 700 m·s⁻¹.

4.3. Výhody a nevýhody HVOF nástřiků

Výhody HVOF nástřiků [2,35,42,43,44,45,46]:

- Vysoká hustota a nízká porozita nástřiku díky vysoké rychlosti letících částic
- Vysoká pevnost k podkladovému substrátu a výborná kohezní pevnost povlaku
- Nízký obsah oxidických vměstků v důsledku krátkého času expozice částic
- Chemická stejnorodost přídavného prášku před i po aplikaci
- Hladký povrch
- Zvýšená tvrdost povrchu díky malé degradaci karbidických fází
- Zlepšené korozní vlastnosti nástřiku díky malé porézní tloušťce
- Možnost aplikace větších vrstev díky malému zbytkovému napětí
- Použití na velké řadě materiálů díky mechanickému zakotvení

Nevýhody HVOF nástřiků [2,35,42,43,44,45,46]:

- Obtížnost nanášet nástřik na vnitřní plochy (zejména válcové)
- Omezená možnost nanášet keramické nástřiky
- Aplikace pouze pro kovy s nižší nebo střední teplotou tavení
- Nástřik může být velmi nehomogenní díky velkému počtu ovlivňujících faktorů
- Velikost přídavného materiálu (prášku) je omezena na rozsah přibližně 5 – 60 μm
- Nutnost zkušeného a kvalifikovaného pracovníka pro zajištění bezpečného provozu
- Nutnost zařízení pro tlumení hluku¹³ a odsávání prachu
- Vyšší ekonomické hledisko oproti konvenčním způsobům nástřiků

¹³ Proces HVOF nástřiku dosahuje až 130 dB.

5. Materiály vhodné k nanášení pomocí HVOF

Ve většině případů se jedná o korozivzdorné či otěruvzdorné nástřiky. Aby povlaky plnily očekávanou funkci, musí vykazovat vysokou hustotu, nízkou porozitu, dobrou přilnavost k podkladu a nízký obsah zbytkových oxidických vměstků. Existuje celá řada materiálů vhodných pro korozivzdorné povlaky. Jedná se např. o cermetové povlaky na bázi karbidu chromu ($\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$ či $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-CoNiCrAlY}$) nebo wolframu (WC-Co , WC-Co-Cr). Dále pak povlaky na bázi slitin kobaltu (Stellite 6), niklu (Inconel, Hastelloy C-276, NiCrBSi), hliníku, železa, mědi nebo molybdenu [47,48,49].

5.1. Povlaky na bázi cermetů

Povlaky na bázi cermetů jsou využívány v aplikacích, kde jsou strojní součásti vystavovány vysoce agresivnímu vlivu prostředí. Jedná se o prostředí, ve kterém působí účinky různých druhů opotřebení a vysokých teplotních změn.

5.1.1. Povlaky na bázi CrC

Tyto povlaky se používají ve velmi náročných podmínkách. Jsou velmi odolné proti opotřebení a oxidaci i za zvýšených teplot (až do $1000\text{ }^\circ\text{C}$). Základem povlaku je karbid chromu obklopený kovovou maticí. Ta může být na bázi niklu (NiCr) nebo např. kobaltu (CoNiCrAlY).

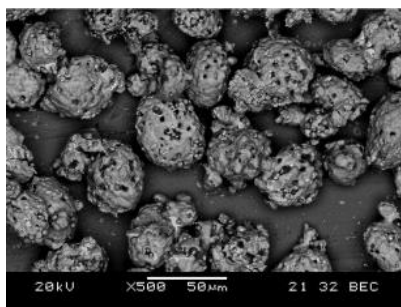
Ve srovnání s povlaky na bázi WC mají povlaky na bázi CrC menší kohezní pevnost díky nižším vazebným silám Cr_3C_2 na kovovou matici. Na druhé straně dosahují vyšší teplotní odolnosti právě díky obsahu chromu [50].

5.1.1.1. $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-25%CoNiCrAlY}$

Jedná se o cermetový povlak s výbornou odolností proti opotřebení až do teploty $1000\text{ }^\circ\text{C}$. Je určen pro tepelně namáhané součásti, jako jsou součásti turbín nebo pecí. Základem tohoto povlaku jsou tvrdé karbidy chromu Cr_3C_2 , které jsou obklopeny maticí CoNiCrAlY [7,51,52,53].

Oproti $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$ by mělo použití CoNiCrAlY matrice vést k vyšší odolnosti proti oxidaci za vysokých teplot a lepším kluzným vlastnostem – ovšem na rozdíl od povlaku $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$, jehož vlastnosti byly mnohokrát zmapovány [6,7,8,9,10,11,12,13,14,15,16,17], existuje prozatím poměrně málo prací, zabývajících se povlakem $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-CoNiCrAlY}$ [50].

Ve studii [54] byly zjišťovány mikrostrukturní změny a tribologické vlastnosti u tepelně ovlivněného povlaku $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-CoNiCrAlY}$. Bylo zjištěno, že při tepelném ovlivnění v peci $900\text{ }^\circ\text{C}$ došlo k precipitaci karbidických částic do matrice, což zvýšilo tvrdost povlaku. Při vyšších teplotách došlo k růstu karbidických zrn, které koagulovaly do rozsáhlých karbidických struktur, jež způsobily pokles tvrdosti uvnitř povlaku. Na Obr. 19 je znázorněn SEM snímek morfologie prášku $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-25%CoNiCrAlY}$ [54].



Obr. 19 - SEM snímek morfologie prášku $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-25%CoNiCrAlY}$ [35].

V této studii byl také použit CoNiCrAlY jako vazebný povlak mezi ocelovým substrát a vrchní povlak Cr_3C_2 -25%CoNiCrAlY. Došlo tak ke snížení rozdílu v koeficientech tepelné roztažnosti mezi vrchním povlakem a substrátem, a tím tak ke zlepšení odolnosti proti tepelnému šoku, adhezivnímu povlaku vůči substrátu a odolnosti proti opotřebení za vysokých teplot [54].

V experimentu [55] byla zjišťována odolnost proti oxidaci oceli NiCr23Co12Mo. Na tuto ocel byl nanesen povlak CoNiCrAlY mechanicky dopován s Al_2O_3 . Odolnost proti oxidaci byla zjišťována před a po tepelném ovlivnění CO_2 laserem¹⁴. Experiment ukázal, že keramické nanočástice Al_2O_3 vytvořily tepelnou bariéru pro prášek CoNiCrAlY, který byl tak při žárovém nástřiku vystaven menší tepelné energii. Výsledky této studie ukazují zlepšení mechanických a tribologických vlastností po tepelném ovlivnění laserem. Rovněž došlo ke zlepšení odolnosti proti oxidaci v 5% roztoku H_2SO_4 a NaCl (58 g/l). Experiment také ukázal, že tepelné ovlivnění zvýšilo tažnost při malém poklesu tvrdosti povlaku [55].

Ve studii [56] byla zkoumána odolnost proti opotřebení a oxidaci za vysoké teploty¹⁵. V této studii byly porovnávány tři cermetové povlaky: Cr_3C_2 -25%NiCr, Cr_3C_2 -25%CoNiCrAlY a Cr_3C_2 -50%NiCr-MoNb. Při tepelném ovlivnění došlo u všech povlaků k precipitaci sekundárních karbidů, což dokládá také studie [54]. U povlaku Cr_3C_2 -25%CoNiCrAlY došlo k precipitaci karbidu Cr_7C_3 . Obsah karbidů po tepelném ovlivnění činil téměř 90 hm. % (zvýšení o 15 % oproti nominálu) a množství matrice pouze 11,5 hm. % (oproti 25 % před tepelným ovlivněním). Povlak se vyznačoval špatnou soudržností s četnými prasklinami na rozhraní karbidů a matrice. Tyto praskliny poté přispěly ke zvýšené vnitřní oxidaci karbidů i při teplotě 600 °C [54,56].

5.1.2. Povlaky na bázi WC

Podobně jako povlaky na bázi CrC jsou povlaky na bázi WC vhodné pro aplikaci v agresivním a náročném prostředí. Tyto povlaky jsou velmi odolné proti opotřebení a korozi. Oproti povlakům na bázi CrC mají vyšší kohezní pevnost, avšak jsou určeny do teplot zhruba 500-600 °C, zatímco CrC povlaky odolávají až 900-1000 °C [57].

HVOF stříkané WC-Co povlaky mají stejnou tvrdost a otěruvzdornost jako stejný materiál připravený práškovou metalurgií. Tyto povlaky odolávají opotřebení a jsou vhodné pro nejrůznější pouzdra pro uložení ložisek na hřídelích rotorů, nebo pro nárazníky kompresorových lopatek [60,61].

5.2. Povlaky na bázi slitin

5.2.1. Povlaky na bázi slitin Co

Povlaky na bázi slitin kobaltu se využívají u celé řady aplikací, kde je vyžadována vysoká odolnost proti opotřebení nebo korozi. Vlastnosti těchto povlaků vycházejí z krystalografické struktury kobaltu, jež je schopna odolávat vysokému zatížení. Důležitými prvky jsou především chrom, wolfram a molybden, které společně s uhlíkem vytvářejí karbidy. Množství uhlíku v povlaku ovlivňuje množství objemu karbidických částí v povlaku. Jedná se především o karbidy typu M_7C_3 a M_6C , kde M označuje kovový prvek. Chrom také zvyšuje pevnost materiálu a odolnost proti korozi. Wolfram a molybden zvyšují pevnost základní matrice a usnadňují precipitaci karbidu M_6C [5,7,57,62,63].

¹⁴ Parametry tepelného ovlivnění: Příkon laseru 3 kW, průměr paprsku 310 mm, posuvová rychlost 5 mm/s, hloubka penetrace 239 μm .

¹⁵ Odolnost proti oxidaci byla měřena při teplotě 609 °C a tlaku 24 MPa. Odolnost proti opotřebení byla poté měřena při pokojové teplotě a při zvýšené teplotě 600 °C dle ASTM G-133.

Dále tyto povlaky mohou obsahovat nikl, železo, hliník, bór, mangan, fosfor, síru, křemík nebo titan. Jedná se např. o povlaky Stellite (CoCrWCSi, CoCrNiWTaC, CoCrNiWC), Tribaloy (CoMoCrSi) nebo CoCrAlY (CoCrAlYSiBN). Aplikace těchto povlaků nachází uplatnění napříč různými odvětvími průmyslu, viz kap. 4.2 [5,7,57,62,63].

5.2.2. Povlaky na bázi slitin Ni

Stejně tak jako povlaky na bázi slitin kobaltu se povlaky na bázi slitin niklu používají v těch nejnáročnějších podmínkách. Mají velmi dobrou odolnost proti oxidaci za vysokých teplot. Vysoký obsah niklu a molybdenu činí povlak obzvláště odolným proti bodové a štěrbinové korozi, zatímco chrom zajišťuje odolnost proti oxidačním médiím. Dále jsou tyto povlaky odolné proti silným roztokům solí [7,57,62,63].

Podobně jako i povlaků na bázi slitin kobaltu mohou povlaky na bázi slitin niklu obsahovat řadu dalších prvků. Tyto povlaky se dají rozdělit na povlaky Ni, NiAl, NiCr, NiCrAl, NiCrAlMo, NiCrBSi, Inconel nebo Hastelloy. Povlaky mohou rovněž obsahovat malé množství křemíku a bóru. Křemík a bór plní funkci tavícího činidla, jelikož usnadňují reakci mezi natavenými letícími částicemi a oxidickým tenkým povlakem na povrchu substrátu, a tím tak zajišťují vyšší hustotu povlaku a podporují selektivní korozi, což vede k vytvoření ochranné vrstvy v počátečních fázích koroze a zlepšení přilnavosti vnější vrstvy k povlaku v dalším procesu vysokoteplotní koroze [7,57,62,63].

6. Následné zpracování žárových nástřiků

Následné zpracování žárových nástřiků se používá více než 20 let a je jedním z hlavních aspektů pro kvalitu výsledného povlaku. Samotný žárový nástřik je použitelné i bez následného ovlivnění, ovšem dodatečné zpracování zásadně zvyšuje životnost, odolnost proti korozi a opotřebení. Následné zpracování lze rozdělit do tří hlavních skupin: tepelné ovlivnění, impregnace a mechanické zpracování [64]. Následné zpracování žárových nástřiků pomocí laseru je detailně zpracováno v kap. 7.

Obecně do následného zpracování žárových nástřiků patří procesy a technologie, které mění výslednou mikrostrukturu, sníží vnitřní napětí a porozitu, zlepší homogenitu povlaku nebo redukují oxidické vměstky [64].

6.1. Tepelné ovlivnění

6.1.1. Elektromagnetické ovlivnění

6.1.1.1. Elektrické jiskrové spékání

Elektrické jiskrové spékání (SPS) je proces rychlého slinování porézních materiálů, podobně jako u lisování za tepla. Vzorek je vložen do grafitové formy a následně jsou vedeny impulzy stejnosměrného proudu přes elektrody připojené k formě. Teplo se generuje Joulovým efektem skrze protékající proud v kovu či slitinách, nebo iontovou vodivostí v oxidech. V druhém případě elektrické pole vytváří výboje (jiskrová plazma) v dutinách a pórů, které podporují účinné vytápění, zatímco iontové vedení ohřívá objem materiálu při vyšších teplotách [65].

6.1.1.2. Mikrovlnné slinování

Při tomto typu ovlivnění je teplo generováno ve vnitřní části vzorku. Proto je teplotní profil obráceně vzhledem k ohřevu v peci. Ztráty energie jsou zde minimální, až 100 % elektromagnetické energie může být přeměněno na ohřev. Mechanismus ohřevu je založen na přeorientování dipólu a náboj iontu. Kovy obecně mikrovlnné záření neabsorbují, ale odrážejí. Ovšem část energie je adsorbována tenkou vnější vrstvou na povrchu vzorku a dochází tak k ohřívání díky ztrátám vířivých proudů. Dle [66] je pro žárové nástřiky nejvhodnější frekvence 2,45 GHz [65].

6.1.1.3. Elektronový paprsek

Tato metoda je velmi užitečná při malých a přesně definovaných oblastech, které jsou potřeba tepelně ovlivnit. Svazek elektronového paprsku může být situován na velmi malou plochu díky kratší vlnové délce elektromagnetických vln. Nevýhoda této metody je nutnost použití vakua, které omezuje do jisté míry maximální rozměry vzorku. Pomocí elektronového paprsku lze tepelně ovlivnit pouze elektricky vodivé materiály. V opačném případě by se elektrony nabíjely negativně a odrážely zpět [65].

6.1.2. Ohřev v peci

Při této metodě je vzorek zahříván na požadovanou teplotu, která je nižší než teplota tavení. Ohřev probíhá buď kontinuálně, nebo stupňovitě, v závislosti na rozdílech koeficientů teplotní roztažnosti povlaku a substrátu. Při velkém rozdílu těchto koeficientů dochází k velkému gradientu teploty a mezi povlakem a substrátem dochází k tepelnému napětí. Ohřev může být prováděn v pecní atmosféře za přítomnosti vzduchu nebo inertního plynu, ve vakuové nebo nízkotlaké peci s inertním plynem, nebo jako indukční ohřev [65].

Po ohřevu dochází k difuzi mezi povlakem a substrátem, a tím tak ke zvýšení pevnosti mezivrstvy. Rovněž dochází ke snížení zbytkových napětí a zvýšení kohezní pevnosti mezi částicemi povlaku. Při této metodě může dojít ke strukturním a fázovým přeměnám, stejně tak jako k precipitaci karbidů nebo nitridů. Množství oxidů lze regulovat vhodným výběrem pecní atmosféry (vodík nebo vakuum) [5,65].

6.1.3. Izostatické lisování za tepla

Izostatické lisování za tepla (HIP) je proces tváření a zhušťování za použití ohřátého plynu (nejčastěji argon nebo dusík) za velmi vysokého tlaku. Na rozdíl od mechanické síly, která stlačuje vzorek ze dvou stran, je při HIP vzorek stlačován ze všech stran. Používá se pro ovlivnění povrchu kovů, keramiky nebo kompozitu. Standardní provozní tlaky se pohybují od 10-200 MPa za teploty až 2 000 °C. Vzorek je utěsněn v nádobě, kde je pomocí kompresorů vtlačen pracovní plyn. Konečných tlaků se dosáhne díky expanzi horkého plynu.

Díky této metodě je možné výrazně zlepšit mechanické vlastnosti, jako např. odolnost proti únavě a opotřebení, stejně tak jako zvýšení tažnosti, nebo odstranění vnitřních vad a pórů. V současné době je tato metoda nejvíce používána na odstranění vad v odlitcích, ovšem stále častěji nachází uplatnění také v práškové metalurgii [65,67].

6.1.4. Natavení plamenem

Touto metodou se zpravidla tepelně ovlivňují tzv. samotavné slitinové povlaky, jako např. NiCrBSi, obsahující bór nebo křemík (popř. jiný prvek, který snižuje teplotu tavení). Ovlivnění plamenem je druh povrchové úpravy, při kterém lze snadno částečně natavit, nebo úplně roztavit povlak, u kterého dochází k homogenizaci a snížení vnitřních napětí. Teplota plamene se pohybuje lehce nad 1 000 °C. Ovlivněný povlak vykazuje velmi dobrou hustotu (až 100%), zvýšenou odolnost proti korozi a rázům. Rovněž dochází ke snížení vnitřních oxidů, jelikož povlak obsahuje prvky, které reagují s kyslíkem za vzniku oxidů. Výsledné oxidy mají nízkou hustotu, a dochází tak k jejich pohybu na povrch povlaku [5,65,68].

6.2. Impregnace

Impregnace se nejčastěji používá pro porézní povlaky, u kterých může dojít k penetraci kapalin či plynů, a tím tak k degradaci vlastností v důsledku koroze. Tekuté těsnící látky pronikají kapilárními účinky do pórů. Impregnace může být doprovázena tepelným účinkem, jenž usnadňuje difuzi a homogenizaci mikrostruktury. Rozhodující je i tlak, při kterém je impregnace provedena (atmosférický tlak, za nízkého tlaku či podtlaku). Volba použitého tlaku je závislá na velikosti vzorku, požadované hloubce penetrace a na vlastnostech těsnící látky (viskozita a odolnost proti korozi). Impregnace je prováděna štětcem, namáčením či postřikem. Těsnící látky lze rozdělit na anorganická a organická [65].

Mezi anorganické těsnící látky patří např. Sol-Gel metoda, kdy je na povlak nanášen organický prekurzor roztaveného kovu, který následně proniká do pórů díky kapilárním silám. Mezi další anorganické těsnící látky patří látky na bázi fosforečnanu hlinitého, kdy je hydroxid hlinitý spolu s kyselinou trihydrogen fosforečnou aplikován na povrch. Následuje tepelné ovlivnění při teplotách 100-400 °C kvůli kompletní dehydrataci fosforečnanu hlinitého [65,69].

Jako organické těsnící látky jsou nejčastěji využívány epoxidové fenoly a pryskyřice, lněné oleje, polyamidy, vosky, barvy, polyuretany nebo uhelné dehty [5,64].

6.3. Mechanické zpracování

Mechanické zpracování patří k nejvíce používaným metodám dodatečné úpravy povlaků. Na finální výrobek jsou předepsány určité rozměrové tolerance či drsnost povrchu. Rozměrové tolerance jsou splněny broušením (někdy i lapováním) a požadovaná drsnost povrchu je dosažena leštěním nebo lapováním. Velmi časté je i použití kuličkování (shot peening), kdy dochází k intenzivnímu bombardování povrchu malými globulárními částicemi, jež plasticky deformují povrch, a zvyšují tak povrchové tlakové napětí (zvýšení únavové pevnosti a snížení porozity povlaku).

Pro broušení se používají diamantové kotouče, popřípadě kotouče s kubickým nitridem bóru CBN. Pro povlaky s kovovou matricí a karbidickou výztuží se používají kotouče s karbidem křemíku SiC. Důležité parametry pro broušení jsou: typ abraziva, velikost brusného zrna, rychlost otáčení kotouče a hloubka broušení.

Leštění se provádí na stejných zařízeních jako při broušení, jen s jemnějším brusivem. Leštěný žárový nástřík dosahuje drsnosti R_a 0,2. Pro dosažení menší drsnosti se využívají lapovací stroje, které využívají diamantové částice, popř. oxid chromitý, ve vrstvách tuku a olejů [65].

7. Laserové zpracování žárově stříkaných povlaků

Žárový nástrík může obsahovat velké množství mikrotrhlinek, pórů či oxidických vměstků. Inepatrné množství těchto fragmentů výrazně snižuje životnost součásti, odolnost proti opotřebení a korozi za zvýšených teplot, tvrdost nebo Youngův modul pružnosti v tahu. Aplikace laserového záření výrazně zvyšuje hustotu a homogenitu povlaku, a tím redukuje pokles výše zmíněných vlastností. Nejčastěji se v praxi používají CO₂ lasery a Nd: doped glass nebo Nd:doped YAG lasery. Jednotlivé metody laserového zpracování jsou popsány v kap. 2.

Laserovým přetavováním HVOF nástríků na bázi cermetů (Cr₃C₂-25%NiC) se ve své práci zabýval Morimoto [10]. Jím navržený experiment využíval 500W diodový laser s vlnovou délkou 807 nm bez použití optického vlákna. Profil laserového paprsku byl elipsoidního tvaru o rozměrech 230 × 1820 μm a posuvová rychlost se pohybovala od 2 – 8 mm·s⁻¹.

V experimentu bylo ukázáno, že při zvyšujícím se výkonu laseru se zvyšovala také hloubka přetavené vrstvy. Při parametrech 200 W a 2 mm·s⁻¹ byla hloubka ovlivněné vrstvy stejná, jako původní žárový nástrík. Při stejných parametrech bylo dosaženo zvýšení tvrdosti z 860 – 922 HV na 955 – 1048 HV vlivem precipitace tvrdých karbidických fází. Odolnost proti opotřebení byla zvýšena zhruba o 50 % oproti nepřetavenému žárovému nástríku. Jako problematické se v této studii ukázalo vytváření prasklin na povrchu součásti. Vertikální praskliny byly vytvořeny při chladnutí vlivem vysokého tepelného gradientu. Horizontální praskliny se poté objevovaly při nižších posuvových rychlostech.

V další práci pana Manna [11] bylo zkoumáno laserové přetavení HVOF nástríku WC-CoCr. Při tomto experimentu bylo použito vysokovýkonné laserové diody o výkonu 4,6 kW s optickým vláknem. Intenzita laserového svazku se pohybovala od 2785 – 2530 J·cm⁻². Teplota povrchu přetaveného vzorku dosahovala 1525 – 1575 °C při pohybové rychlosti 1,5–5 mm·s⁻¹.

Po laserovém přetavení byla zvýšena mikrotvrdost z 1520 HV na 1845 HV. Rovněž byla změřena vrubová houževnatost podle Evans-Charles, jež vzrostla po laserovém přetavení z 1,5 na 7,5 MPa√m. XRD analýza ukázala, že laserové přetavení nemělo výrazný vliv na chemické složení vyjma tvorby sekundárních karbidů W₂C. Před laserovým přetavením byly v povlaku pozorovány četné oxidické vměstky a póry. Po přetavení se množství oxidických vměstků snížilo a došlo k jejich rovnoměrnému rozdělení v povlaku. Nepochybným úspěchem tohoto experimentu byla reálná aplikace přetavení na nízkotlaké parní turbíně.

Laserovým přetavením se také zabýval experiment pod vedením pana Yina [13]. V této studii byly zjišťovány mechanické a tribologické změny HVOF nástríku na bázi cermetů (WC-Co, WC-NiCr, Cr₃C₂-NiCr). Pro přetavení byl použit 2,25 kW CO₂ laser. Profil laserového svazku byl kruhový s průměrem 6 mm s překrytím 50 %. Posuvová rychlost se pohybovala od 1 – 2,5 mm·s⁻¹.

Experiment ukázal zlepšení homogenity povlaku a snížení množství pórů, ovšem byly pozorovány také horizontální praskliny na okrajích laserových stop. Mikrotvrdost byla po přetavení zvýšena u všech tří povlaků zhruba o 100 – 150 HV. U všech povlaků byl také zaznamenáno zvýšení odolnosti proti opotřebení o 30-50 % oproti neovlivněnému vzorku.

Janka [12] se ve své studii zabýval změnou mikrostruktury, mechanických a tribologických vlastností při laserovém přetavení povlaku Cr₃C₂-NiCr. V tomto experimentu bylo použito vysokovýkonné laserové diody o výkonu 3 kW a vlnové délce 975 nm. Profil laserového svazku byl obdélníkový o rozměru 24 × 12 mm. Hustota laserového svazku dosahovala

$10,4 \text{ W}\cdot\text{mm}^{-2}$ při posuvových rychlostech od $6 - 14 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$, respektive intenzitě záření od $8,9$ do $20,8 \text{ J}\cdot\text{mm}^{-2}$.

Studie ukázala zvýšení vrubové houževnatosti, mikrotvrdosti a odolnosti proti opotřebení po laserovém přetavení. Došlo také k precipitaci sekundárních karbidů chromu na hranicích zrn matrice NiCr. Stejně jako ve studii [11] bylo zaznamenáno snížení množství pórů a oxidických vměstků a zvýšení odolnosti proti opotřebení o 35-65 % v závislosti na parametrech laseru.

Na základě výše uvedených studií je patrné, že laserové zpracování má vliv na mechanické vlastnosti, ale je nutné nalézt vhodné parametry. Zatímco pro slitinové povlaky a povlaky na bázi CrC-NiCr již nějaké studie existují, zatím se nikdo nezabýval povlakem CrC-CoNiCrAlY. Tento materiál má velký potenciál, ale jeho vlastnosti nejsou takové, jaké by mohly být. Cílem práce je zmapovat vliv parametrů laserového zpracování a posoudit, zdali jeho aplikace může vést ke zlepšení vlastností povlaku.

Experimentální část

8. Použité experimentální metody

8.1. Analýza mikrostruktury

Ocelový plech s povlakem byl nařezán dle požadovaných rozměrů na pile Struers Labotom-3. Dále byly vzorky zality do epoxidové pryskyřice ISOFAST v zařízení Struers ProntoPress-20. Broušení a leštění bylo provedeno na leštícím přístroji Struers LaboPol-5. Nejprve byly vzorky broušeny na kotouči MD Piano 120. Dále byly použity kotouče MD Rondo (9,6 a 3 um) popřípadě i MD Dac 1 um. Při broušení a leštění byly používány leštící pasty značky BUEHLER (9,6,3 a 1 um).

Pro vyhodnocení snímků mikrostruktury pomocí optické mikroskopie byl použit přístroj Nikon model EPIPHOT 200.

Analýza mikrostruktury pomocí řádkovací elektronové mikroskopie (SEM) byla provedena na přístroji SEM Quanta 200, který byl také vybavený detektorem EDX od firmy EDAX.

Měření rentgenové difrakční analýzy (XRD) bylo provedeno v Ústavu fyziky plazmatu AV ČR na zařízení D8 Discover – práškový rentgenový difraktometr s 1D detektorem $\text{CoK}\alpha$ záření (měřeno v oblasti od 20 do 100 $^{\circ}2\theta$ s krokem 0.03 $^{\circ}2\theta$ a prodlevou 96 s mezi jednotlivými kroky [70,71]).

Na Obr. 20 až 23 jsou zobrazeny některé použité přístroje.



Obr. 20 - Kotoučová rozbrušovací pila Struers Labotom-3 [72].



Obr. 22 - Zalisovací zařízení Struers Prontopress-20 [73].



Obr. 21 - Bruska a leštička Struers LaboPol-5 [74].



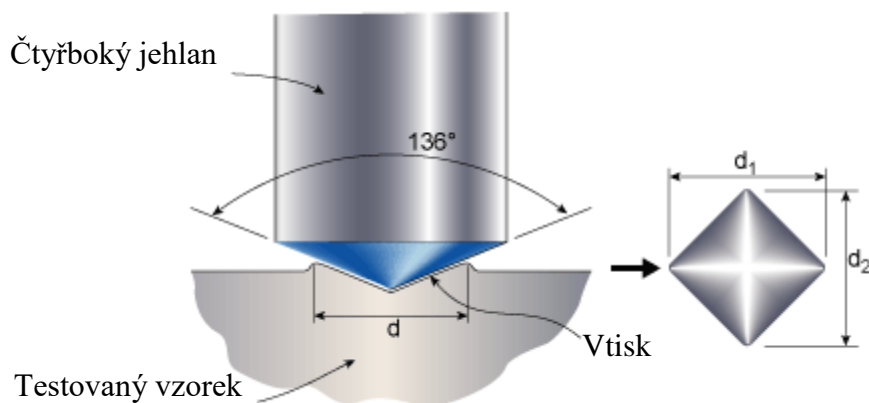
Obr. 23 - Termoemisní SEM Quanta 200 od firmy FEI s EDX detektorem (mikrosonda) od firmy EDAX [75].

8.2. Měření průběhu mikrotvrdomosti

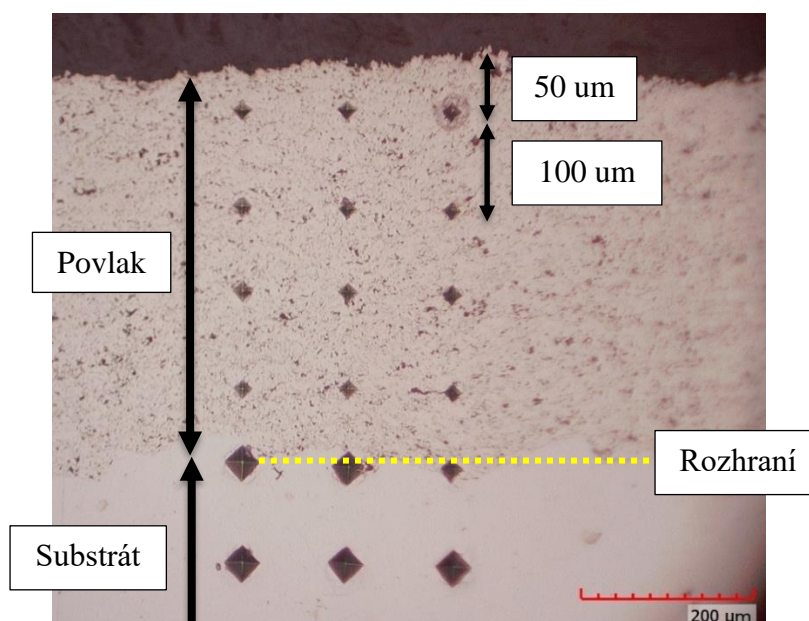
Pro zkoušku mikrotvrdomosti byla použita metoda dle Vickerse (HV0,3) při zatížení 0,3 kg. Tato zkouška je založena na vtlačování diamantového tělesa ve tvaru pravidelného čtyřbokého jehlanu se čtvercovou základnou a vrcholovým úhlem 136° , viz Obr. 24. K určení hodnoty tvrdosti se měří úhlopříčky vtisku, které vzniknou po odlehčení zkušební tělesa. Tato zkušební metoda je dána normou dle ČSN EN ISO 6507-1 (Kovové materiály - Zkouška tvrdosti podle Vickerse - Část 1: Zkušební metoda) a dále normou ČSN EN ISO 4516 (Kovové a jiné anorganické povlaky - Zkoušky mikrotvrdomosti podle Vickerse a podle Knoop) [30,76,77].

Měření tvrdosti bylo provedeno pomocí mikrotvrdoměru BUEHLER. Vtisky byly umístěny cca 50 μm od povrchu povlaku a dále po 100 μm až k materiálu substrátu (viz Obr. 25). V každé vzdálenosti byla provedena 3 měření, z nich spočten aritmetický průměr a směrodatná odchylka.

Pro vyhodnocení tvrdosti byl použit vztah $HV = 0,189 \cdot \frac{F}{d^2}$, kde F je síla zatížení (0,3 kg = 2,94 N) a d je průměr úhlopříček vtisku.



Obr. 24 - Schéma měření tvrdosti podle Vickerse [78,79].



Obr. 25 - Měření mikrotvrdomosti dle Vickerse.

8.3. Měření opotřebení metodou Ball-on-Flat dle ASTM G-133

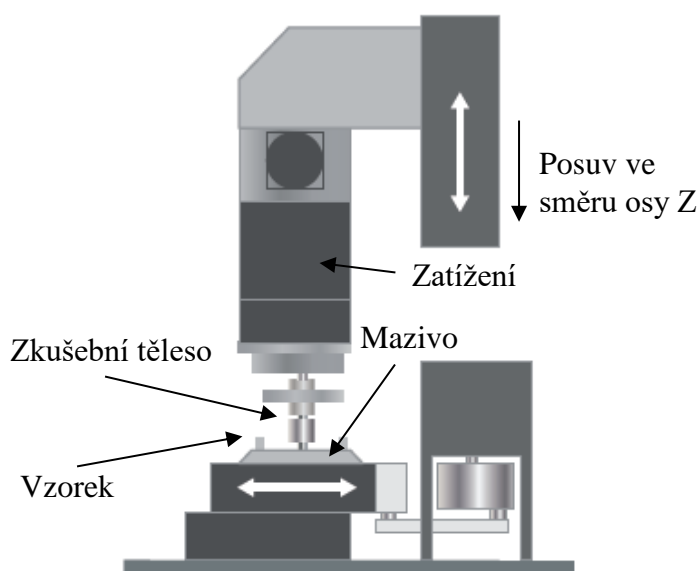
Tato zkušební metoda slouží pro stanovení koeficientu tření a opotřebení kovových, keramických i jiných materiálů. Zkušební těleso tvoří kulička o průměru 6,3 mm pohybující se po povrchu rovinného vzorku. Vzájemný pohyb mezi zkušebním tělesem a měřeným vzorkem je oscilační. Frekvence oscilace, stejně jako ostatní parametry testu, jsou dány normou ASTM G-133 [5,7,80,81].

Parametry testu jsou shrnuty v Tab. 4. Výsledkem této zkušební metody je záznam koeficientu tření (μ) v průběhu testu, průměrná hodnota μ a množství odebraného materiálu za daný časový úsek. Odebraný objem materiálu je stanoven pomocí profilometru, jehož záznamem je průběh hloubky stopy. Schéma této zkušební metody je zobrazeno na Obr. 26 [5,7,80,82].

Měření bylo provedeno ve výzkumném centru nových technologií – NTC ZČU Plzeň na přístroji Bruker CETR-UMT 3, viz Obr. 27.

Tab. 4 - Parametry měření opotřebení metodou Ball-on-Flat dle ASTM G-133

Normální zatížení	25 N
Délka stopy	10 mm
Oscilační frekvence	5 Hz
Teplota	20 ± 2 °C
Mazivo	Žádné
Doba testu	16 min 40 s
Materiál globoidního tělesa	X105CrMo17; 62 HRC
Rozměr globoidního tělesa	\varnothing 6,3 mm

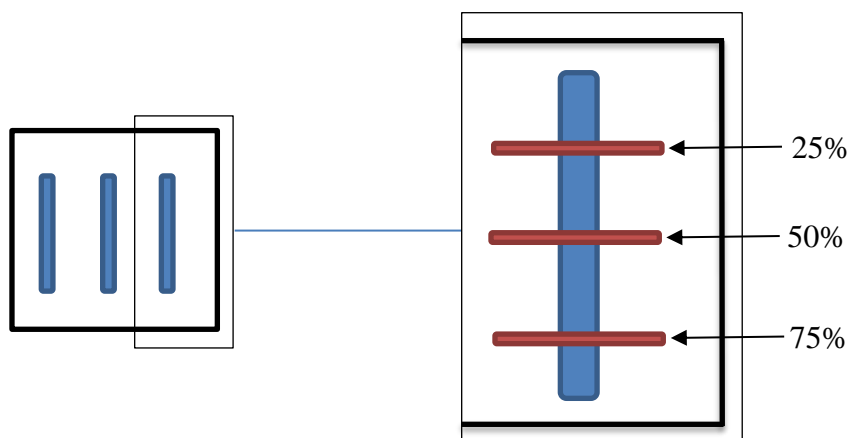


Obr. 26 – Schéma měření opotřebení metodou Ball-on-Flat dle ASTM G-133 [82].



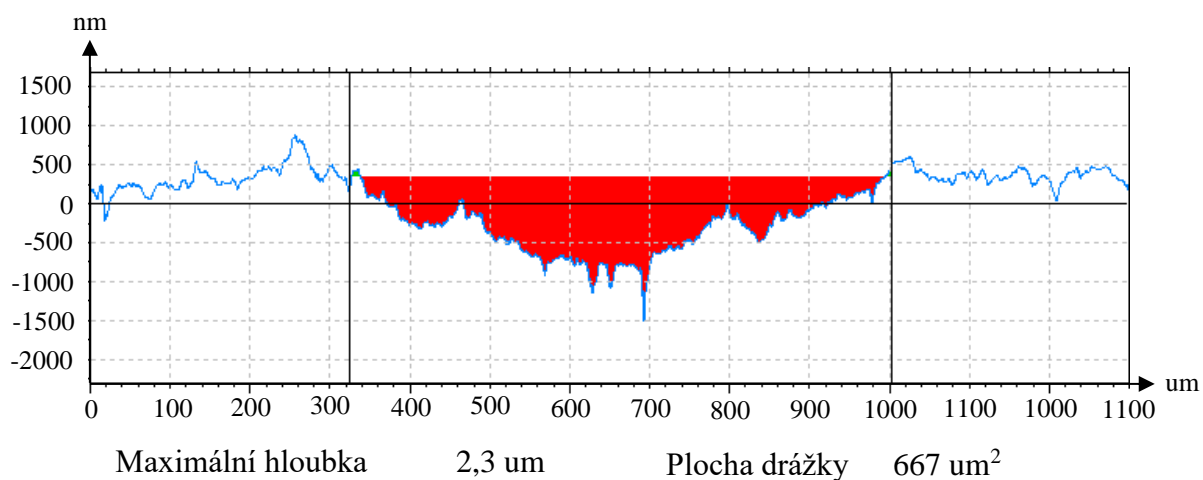
Obr. 27 – Tribometr Bruker CETR-UMT 3.

Na vzorku o rozměru 25x25x10 mm byla postupně provedena 3 měření, viz Obr. 28.



Obr. 28 – Schéma měření drážek při měření opotřebení dle ASTM G-133.

Vyhodnocení velikosti plochy řezu stopy po opotřebení bylo provedeno pomocí profilometru KLA-Tencor P-6 Profiler. Každá stopa byla měřena na třech místech (25%, 50%, 75%), viz Obr. 28. Pro každé toto místo byla provedena tři měření, z nichž byl vypočítán aritmetický průměr. Jeden z výstupů profilometru je znázorněn na Obr. 29. Z průběhu profilu lze zjistit maximální hloubku a plochu stopy.



Obr. 29 - Průběh profilu příčného řezu stopy po zkoušce dle ASTM G-133.

Pro analýzu výsledků byly spočítány hodnoty rychlosti opotřebení (W) a koeficientu opotřebení (K).

$$K = \frac{V}{L \cdot s} \left[\frac{\text{mm}^3}{\text{N} \cdot \text{m}} \right] \quad W = \frac{V}{s} \left[\frac{\text{mm}^3}{\text{m}} \right],$$

kde V je odebraný objem [mm^3], L je zatížení [N] a s je celková délka tření [m].

Mechanismus opotřebení byl následně zkoumán pomocí elektronového mikroskopu SEM Quanta 200.

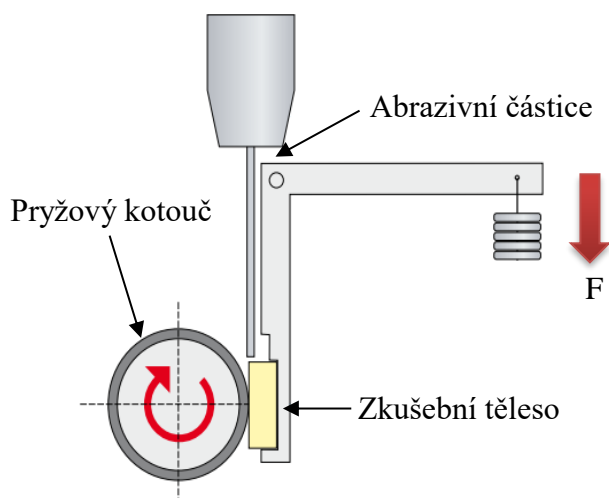
8.4. Měření opotřebení metodou Dry sand rubber wheel test dle ASTM G-65

Zkouška je určena ke stanovení abrazivní odolnosti materiálů. Měřený vzorek je přitlačován přesně definovanou silou k rotujícímu kolu, které je opatřené pryžovou obrubou. Mezi vzorek a rotující kolo jsou vnášeny abrazivní částice o definované zrnitosti a tvrdosti. Výsledkem testu je hmotnostní úbytek testovaného materiálu. Ten je poté přepočítán na objemový úbytek, aby bylo možné srovnávat také materiály o rozdílné hustotě, nebo vypočítat koeficient abrazivního tření. Vlhkost abrazivního média by neměla přesahovat 0,5 % váhového množství. Test je nutné provádět za pokojové teploty 20 ± 2 °C. Parametry tohoto testu je možné vidět v Tab. 5. Na Obr. 30 a 31 je vidět schéma a fotografie zařízení [7,84,85,86,83].

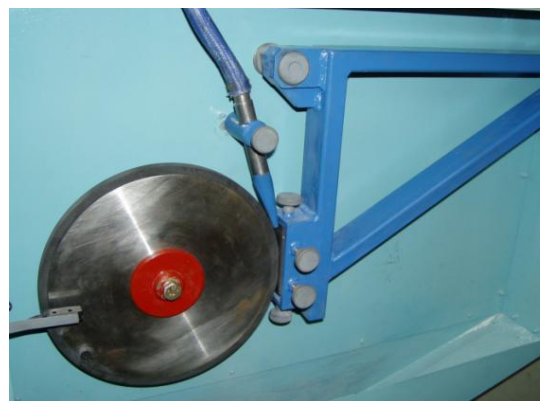
Měření opotřebení dle ASTM G-65 bylo provedeno na pracovišti VZÚ Plzeň s.r.o.

Tab. 5 - Parametry měření opotřebení metodou dry sand rubber wheel test dle G-65.

Průměr kola	231,89 mm
Přítlačná síla	22 N
Obvodová rychlost	200 ot/min
Abrazivní médium	Bílý korund
Zrnitost	212-250 um
Rychlost podávání média	440 g/min



Obr. 30 – Schéma zařízení pro měření abrazivní odolnosti dle ASTM G-65 [84].



Obr. 31 – Zkušební zařízení pro měření abrazivní odolnosti dle ASTM G-65 [7].

Pro výpočet objemového úbytku byla převzata hodnota hustoty této povlaku ve výzkumné zprávě [86] $6,479 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$. Kumulativní objemový úbytek je poté dán vztahem:

$$V = \frac{\rho}{m} \cdot 1000 [\text{mm}^3],$$

kde ρ je hustota materiálu a m je hmotnost materiálu.

9. Příprava vzorků

9.1. Příprava HVOF nástřiku

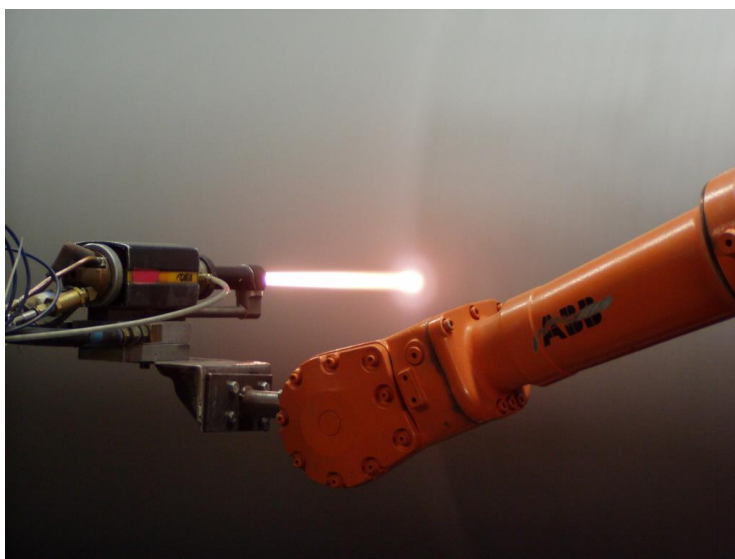
Vzorky HVOF nástřiku Cr_3C_2 -25%CoNiCrAlY byly připraveny ve VZÚ Plzeň pomocí HP/HVOF nástřikového systému TAFA JP 5000, viz Obr. 32 (Obrazová dokumentace – majetek VZÚ Plzeň). Na ocelový plech C45 ve stavu zušlechťeném o rozměrech 200x100x10 mm byl nanesen prášek od firmy H.C.Starck s katalogovým názvem Amperit 594.074. Složení prášku a parametry nástřiku jsou uvedeny v Tab. 6 a 7. Před nástřikem byl povrch otryskán částicemi Al_2O_3 o zrnitosti odpovídající F22. Tloušťka naneseného žárového nástřiku se pohybovala od 400 do 500 μm .

Tab. 6 - Chemické složení prášku Amperit 594.074

Co [%]	Ni [%]	Al [%]	Y [%]	C [%]	Cr [%]
9,5	7,5	1,75	0,2	10	Zbytek

Tab. 7 - Parametry žárového nástřiku.

Ekvivalentní poměr	1,1
Tlak ve spalovací komoře	110 psi
Kyslík	922 l/m
Kerosin	27 l/h
Depoziční vzdálenost	420 mm
Barel	6"
Otáčky podavače	300 RPM
Nosný plyn	Dusík
Průtok dusíku	6,5 l/m
Posuv	250 mm/sec
Offset	6 mm/ot



Obr. 32 - Nástřikový systém TAFA JP 5000.

9.2. Laserové zpracování

Zvolené procesní parametry laserového přetavení vycházejí z již zmiňovaných studií [33,35,42,68,69] zabývajících se laserovým ovlivněním povlaku CoNiCrAlY a z know-how pracoviště Termomechanika Technologických Procesů NTC ZČU, kde bylo laserové zpracování realizováno.

9.2.1. Použitá technologie laseru

Pro laserové přetavení byl použit vysokovýkonný diodový laser ISL-4000L HPDD firmy Coherent s maximálním výstupním výkonem 4,3 kW. Laserový systém byl upevněn v šestiosém průmyslovém robotu FANUC M710IC/50, viz Obr. 33 a 34. Vlnová délka laseru činí 808 ± 10 nm. Výstupní laserový svazek je přibližně 12x1 mm při fokální vzdálenosti 125 mm. Použitím čočky lze laserový svazek rozptýlit na rozměry 12x6 mm.



Obr. 33 - Laserový systém ISL-400L HPDD [87].



Obr. 34 - Robotická hlava FANUC M-710IC/50 [87].

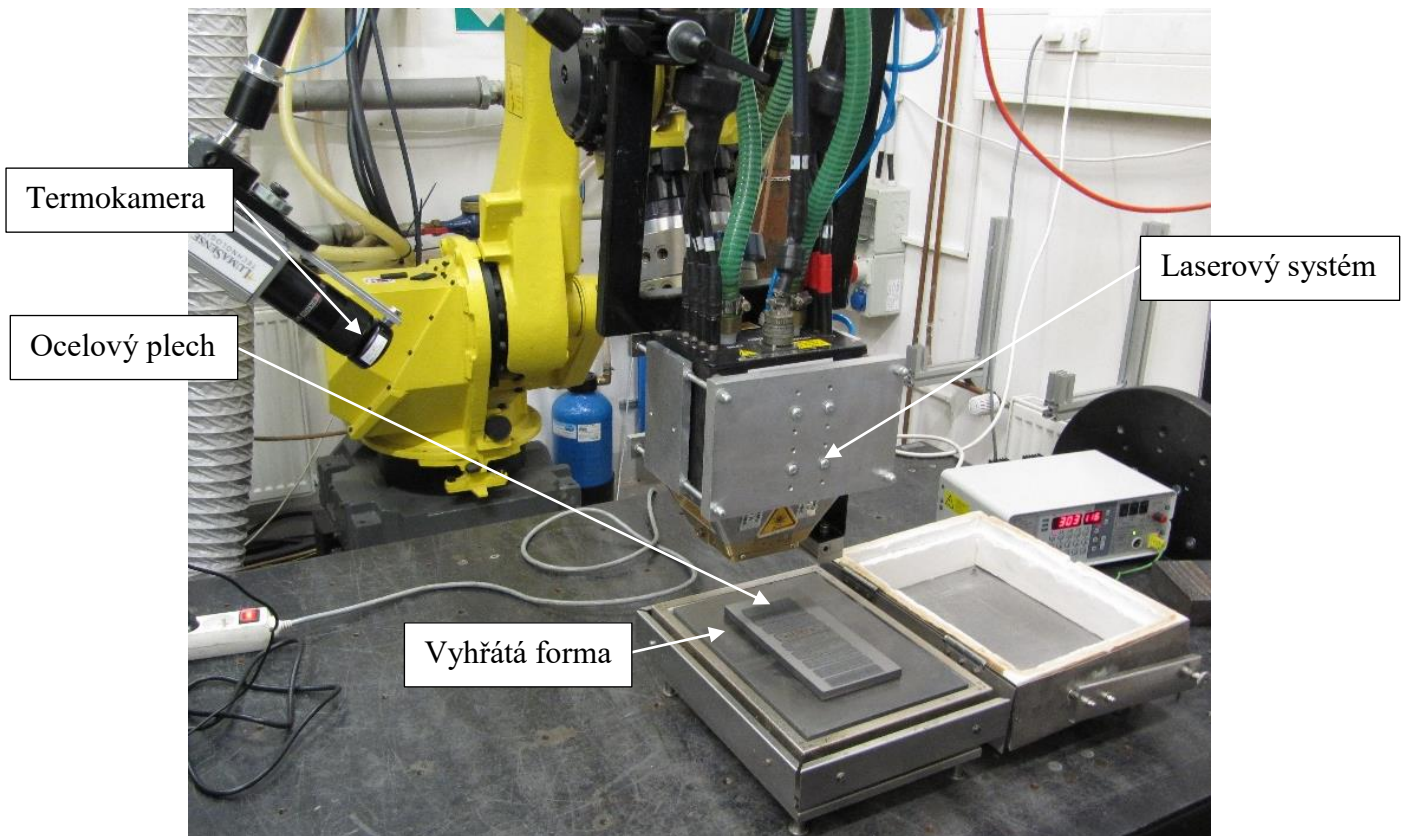
9.2.2. Parametry laserového zpracování

Ocelový plech C45 ve stavu zušlechťeném s žárovým nástřikem byl vložen do předem vyhřáté formy na $350\text{ }^{\circ}\text{C}^{16}$. Parametry série 1 jsou uvedeny v Tab. 8. Na Obr. 35 je vidět nastavení před experimentem. Změnou rychlosti pohybu laserového paprsku a změnou výkonu laseru bylo dosaženo různých energií E_h a výkonové hustoty V_h .

Tab. 8 - Parametry laserového ovlivnění série 1.

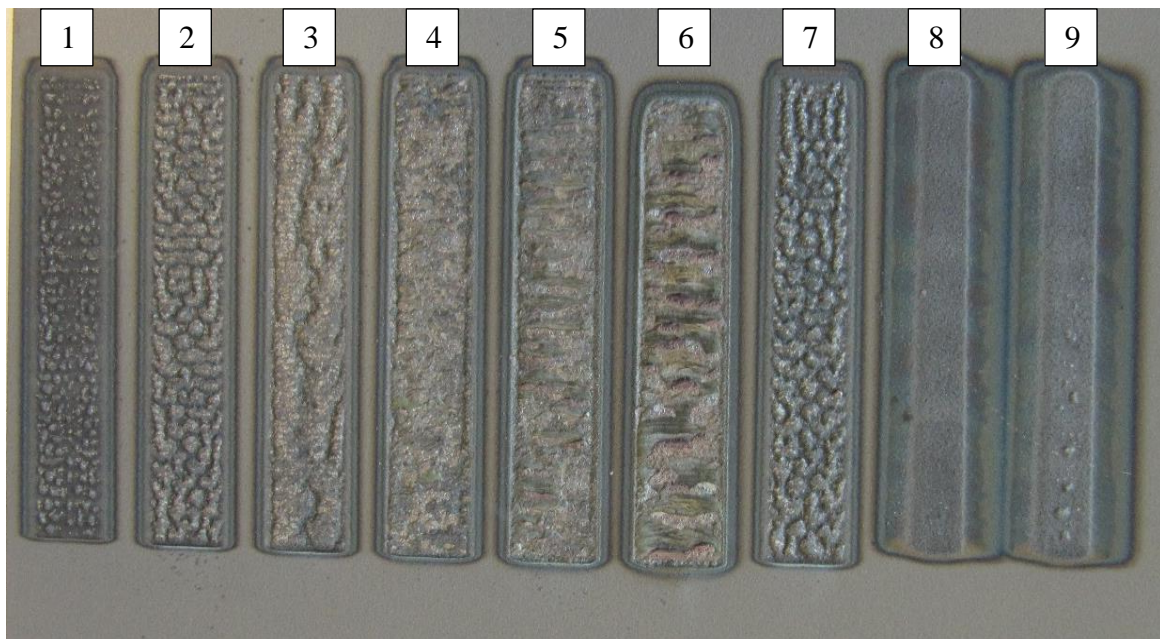
Č.	V	v	Rozměr svazku X	Rozměr svazku Y	E_h	V_h
[-]	[W]	[mm·s ⁻¹]	[mm]	[mm]	[W·mm ⁻²]	J·mm ⁻²
1	1070	10,0	12	1	89,2	8,9
2	1070	6,7	12	1	89,2	13,4
3	1070	5,0	12	1	89,2	17,8
4	1070	3,3	12	1	89,2	26,8
5	1070	2,5	12	1	89,2	35,7
6	1070	1,7	12	1	89,2	53,5
7	1070	5,8	12	1	89,2	15,3
8	2000	13,3	12	1	166,7	12,5
9	2000	11,7	12	1	166,7	14,3

¹⁶ Teplota vzorku byla měřena pomocí pyrometru.



Obr. 35 - Proces laserového zpracování.

Na Obr. 36 je zobrazen ocelový plech s jednotlivými stopami po přetavení série 1.

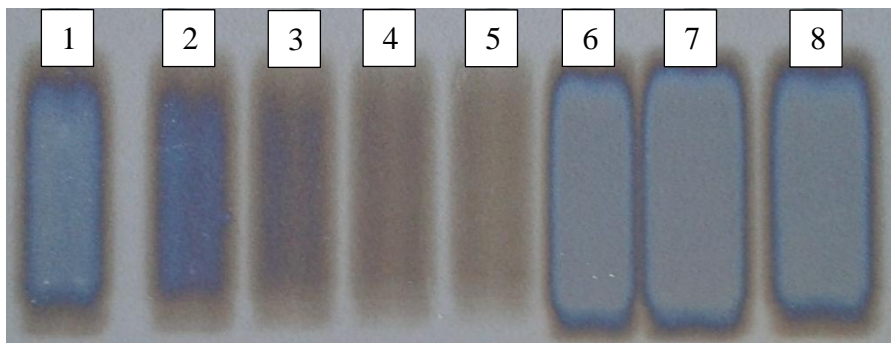


Obr. 36 - Ocelový plech s jednotlivými stopami po přetavení série 1.

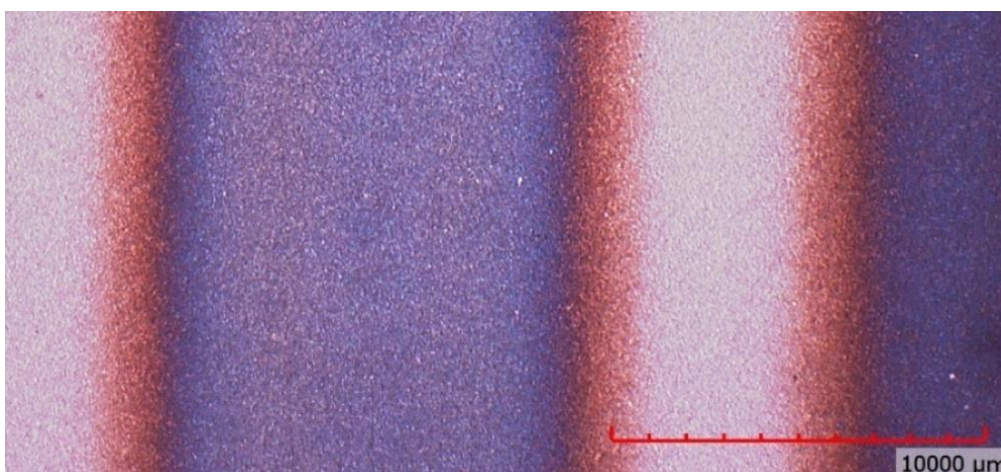
Pro druhou sérii byly zvoleny parametry, viz Tab. 9. Parametry byly zvoleny dle studie Janka et al. [12] tak, aby nedošlo k natavení povrchu, ale pouze k tepelnému ovlivnění materiálu povlaku. Ocelový plech C45 ve stavu zušlechťeném s HVOF žárovým nástřikem byl vložen do předem vyhřáté formy na 350 °C. Na Obr. 37 je vidět makroskopický snímek s jednotlivými stopami po přetavení série 2. Snímek stopy parametru č. 1 série 2 je znázorněn na Obr. 38.

Tab. 9 - Parametry laserového ovlivnění série 2.

Č.	V	v	Rozměr svazku X	Rozměr svazku	E_h	V_h
[-]	[W]	[mm·s ⁻¹]	[mm]	[mm]	[W·mm ⁻²]	J·mm ⁻²
1	750	6,0	12	6	10,4	10,4
2	750	8,0	12	6	10,4	7,8
3	750	10,0	12	6	10,4	6,3
4	750	12,0	12	6	10,4	5,2
5	750	14,0	12	6	10,4	4,5
6	750	4,0	12	6	10,4	15,6
7	1000	6,0	12	6	13,9	13,9
8	1000	8,0	12	6	13,9	10,4



Obr. 37 - Ocelový plech s jednotlivými stopami po přetavení série 2.



Obr. 38 - Snímek povrchu parametru č. 1 série 2. Použité zařízení - Hirox KH-7700.

10. Optimalizace parametrů laserového zpracování vybraného HVOF povlaku

Vliv parametrů laserového zpracování byl hodnocen pomocí snímků z optického mikroskopu metalografických výbrusů vzorků zpracovaných všemi parametry série 1 a 2 (Obr. 40 a 41).

Intenzita přetavení povlaků v rámci série 1 byla závislá na množství vnesené energie (viz Tab. 8).

Povlaky s nižší vnesenou energií (1-3 a 7-9) byly přetaveny jen ve své horní polovině, navíc u nich došlo k vzniku výrazné pórovitosti. Oproti tomu parametry 4 až 6 vedly k přetavení celé vrstvy a ke vzniku bezporézních povlaků.

Laserové tepelné zpracování (série 2) nevedlo ke změnám viditelným pomocí optické mikroskopie. Tepelné zatížení povlaku však způsobilo vznik trhlin. Nejmenší hustota trhlin byla pozorována u povlaku s parametry 5.

Na základě uvedených pozorování byly pro další měření vybrány tyto parametry:

Série 1 Vzorek 5

Série 2 Vzorek 7

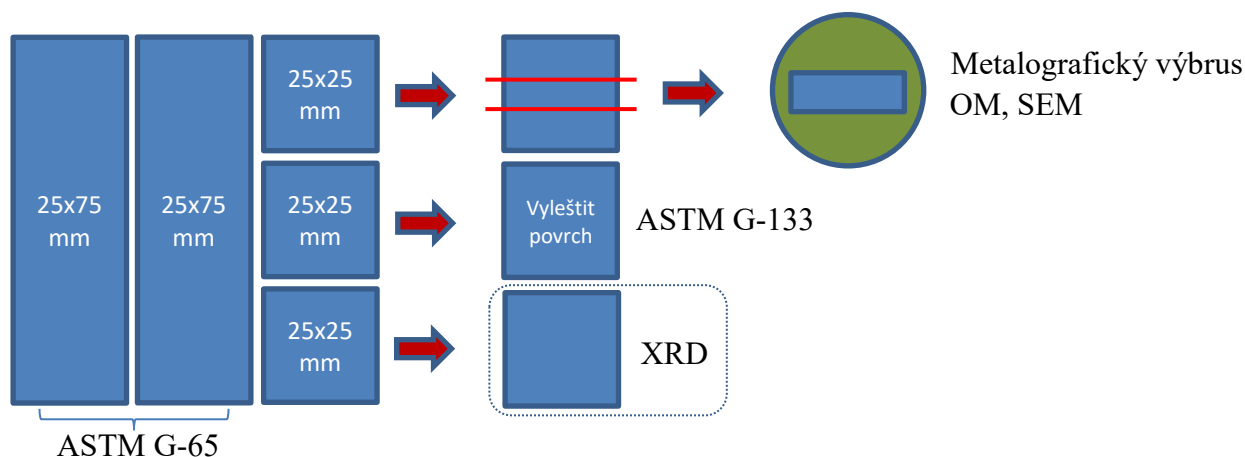
Tyto parametry byly dále porovnávány s neovlivněným povlakem $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-25\%CoNiCrAlY}$.

Parametr Série 1 – Vzorek 5 byl v následující části textu označen jako „**Přetavený**“. Parametr Série 2 – Vzorek 5 byl v následující části textu označen jako „**Ovlivněný**“. Laserem neovlivněný povlak $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-25\%CoNiCrAlY}$ byl dále označen jako „**Neovlivněný**“. Vybrané parametry jsou zobrazeny v Tab. 10.

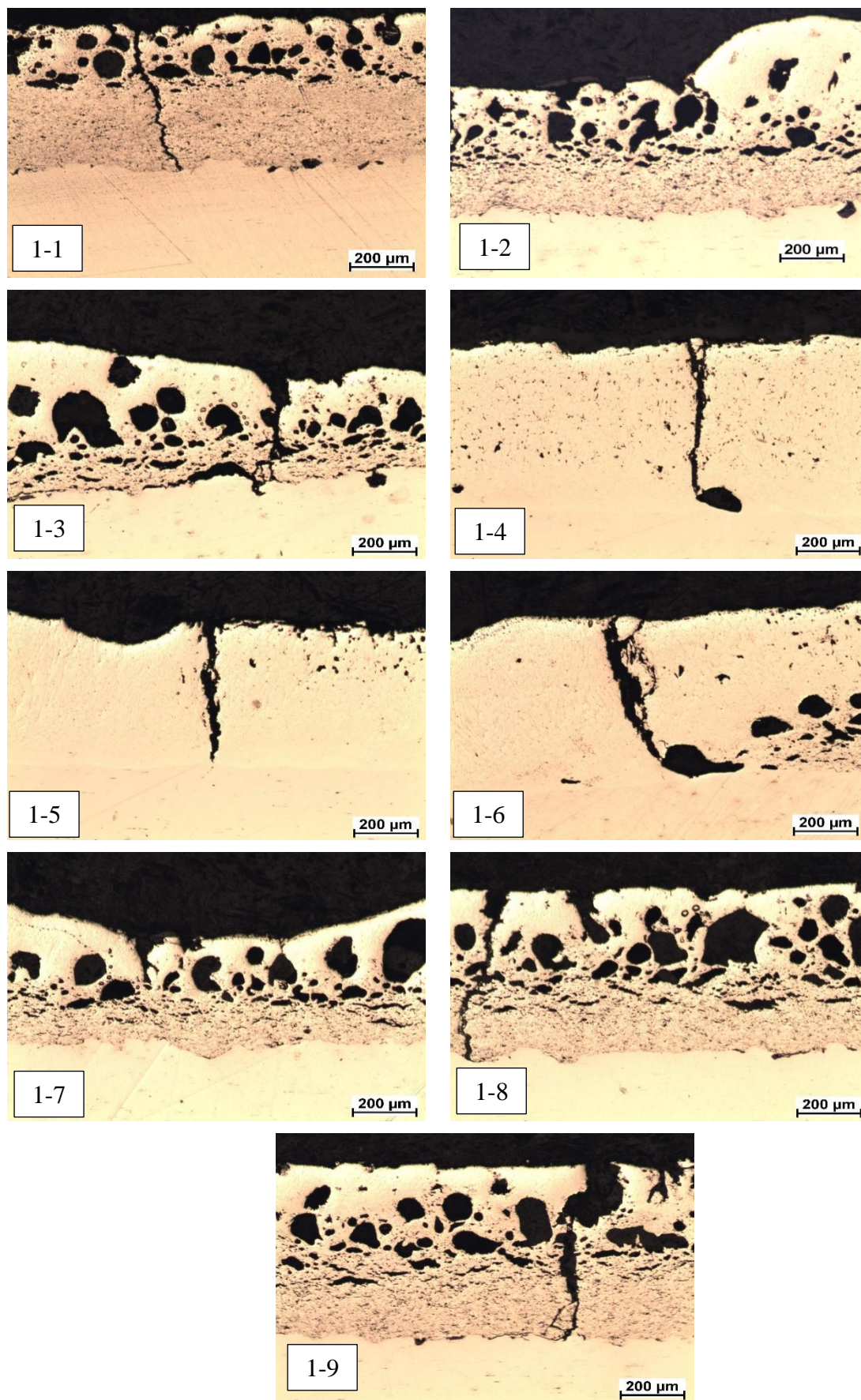
Tab. 10 - Vybrané parametry laserového ovlivněného pro další měření a analýzu.

Označení povlaku	V	v	Rozměr svazku X	Rozměr svazku Y	E_h	V_h
[-]	[W]	[$\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$]	[mm]	[mm]	[$\text{W}\cdot\text{mm}^{-2}$]	[$\text{J}\cdot\text{mm}^{-2}$]
Přetavený	1070	2,5	12	1	89,2	35,7
Ovlivněný	750	14,0	12	6	10,4	4,5

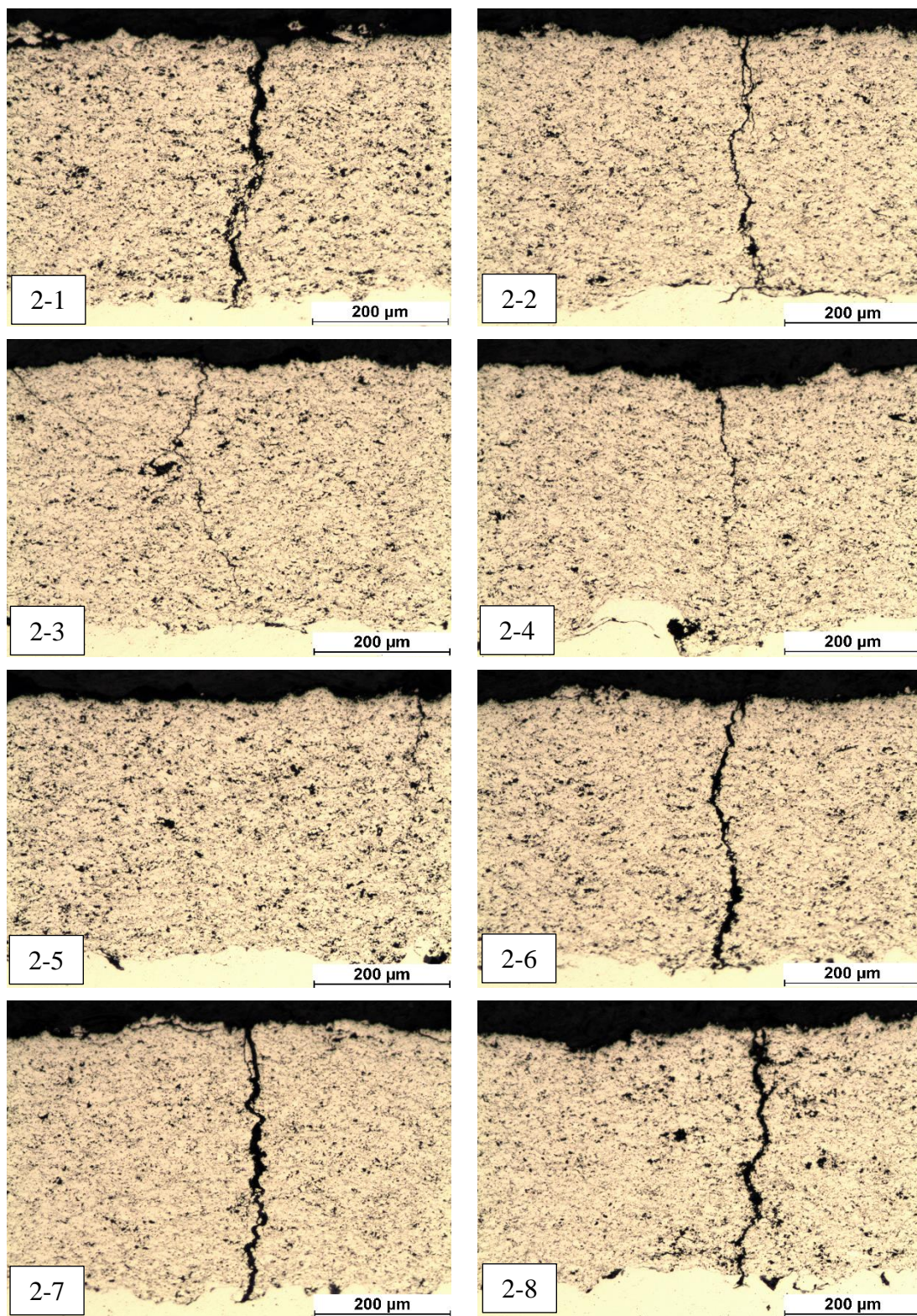
Vybranými parametry byly vzorky laserem zpracovány vzorky tak, aby zpracovaný povrch tvořil souvislou plochu. Ze zpracovaných vzorků byly dělením na metalografické pile připraveny vzorky s rozměry vhodnými pro další testování, viz Obr. 39.



Obr. 39 - Plán experimentální části s vybranými parametry ovlivnění.



Obr. 40 – Snímky mikrostruktury série 1.



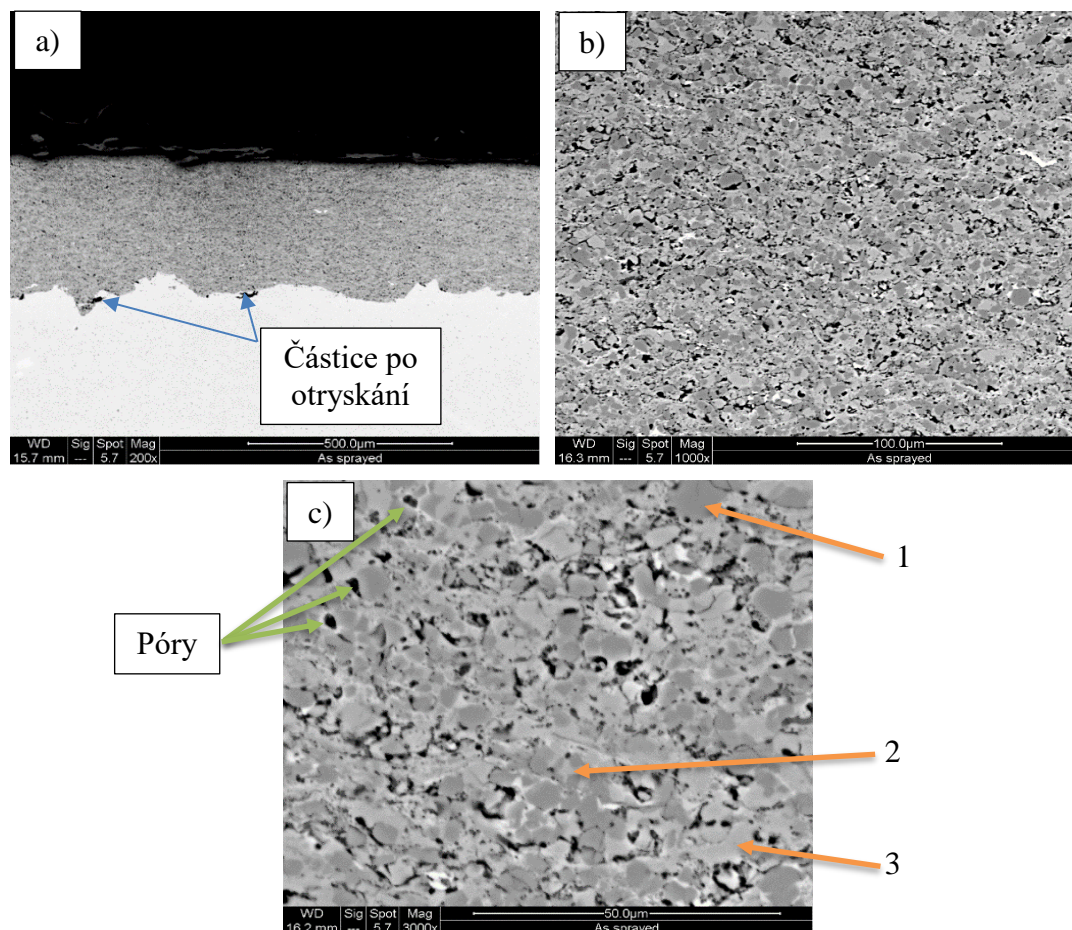
Obr. 41 – Snímky mikrostruktury série 2.

11. Výsledky

11.1. Hodnocení mikrostruktury povlaků

11.1.1. Neovlivněný nástřik

Na obr. 42 je znázorněna mikrostruktura neovlivněného povlaku. Povlak neobsahuje žádné trhliny ani dekoheze. Na snímcích (obr. 42 a) v oblasti rozhraní lze vidět částice Al_2O_3 , které ulpěly na povrchu při otryskání základního materiálu před samotným procesem nástřiku. Mikrostruktura povlaku obsahuje póry, karbidické částice a oblasti kovové matrice (obr. 42 c) Pomocí analýzy EDX bylo zjištěno prvkové složení v jednotlivých částech, které je uvedeno v Tab. 11. Tmavě šedé části (1) představují karbid chromu Cr_3C_2 , popřípadě Cr_7C_3 (pro zjištění vzájemného poměru obou předpokládaných typů karbidů je zapotřebí XRD analýzy). Světlejší části (2) poté reprezentují původní CoNiCrAlY matrici, do které byl při nástřiku rozpuštěn karbid chromu. V oblasti (3) je složení kovové fáze nejbližší složení původní CoNiCrAlY matrice v prášku [57,58,59].



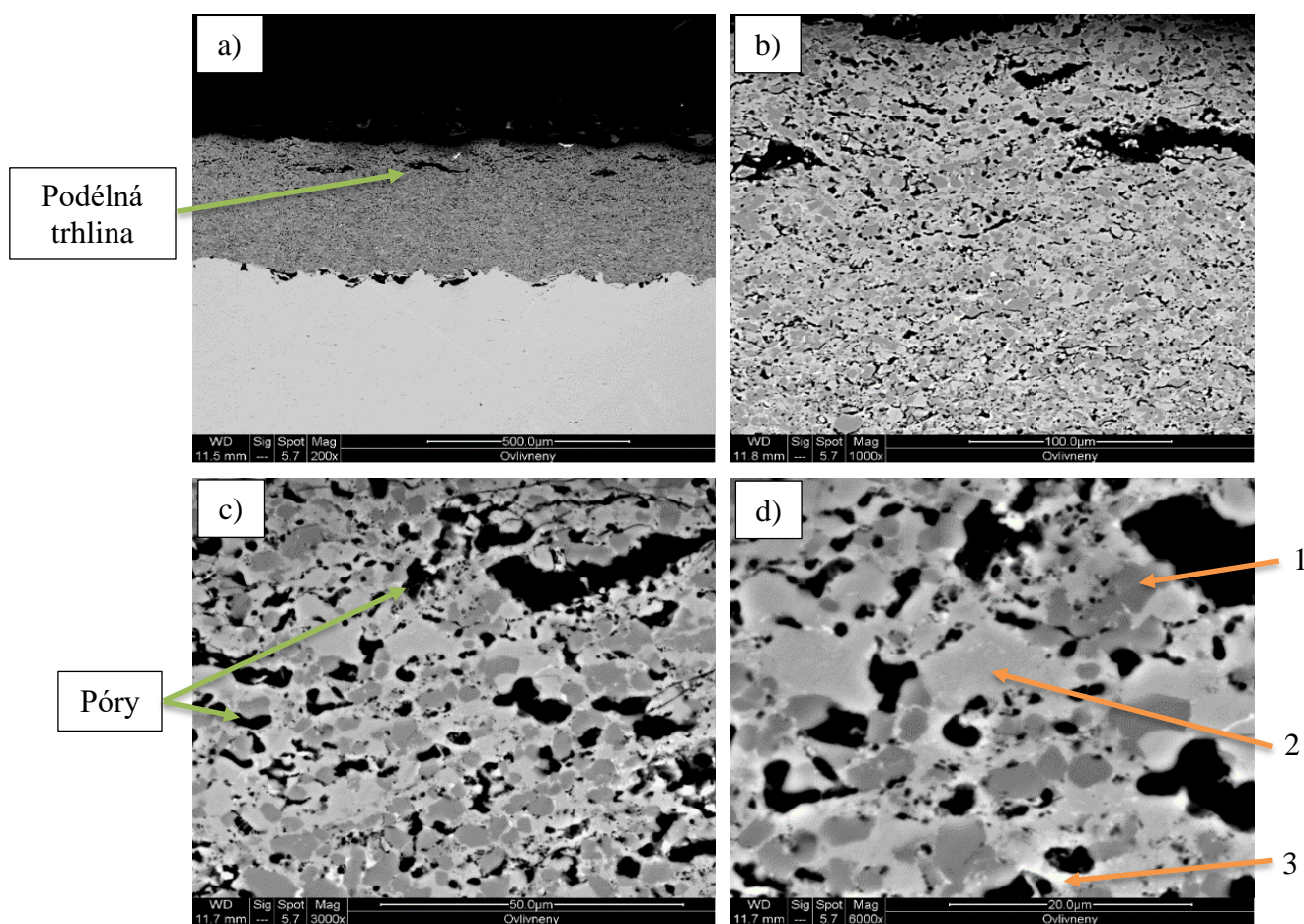
Obr. 42 - Snímky z SME neovlivněného nástřiku. Zvětšení: a) - 200x, b) - 1000x, c) - 3000x

Tab. 11 - Chemické složení neovlivněného nástřiku měřené pomocí EDX analýzy.

	C [%]	Cr [%]	Co [%]	Ni [%]	Al [%]
Místo měření: 1	13,85	82,15	1,84	2,16	-
Místo měření: 2	9,78	67,32	14,78	8,11	-
Místo měření: 3	4,69	19,33	22,28	50,41	3,29

11.1.2. Ovlivněný nástřik

Mikrostruktura ovlivněného povlaku je znázorněna na obr. 43. V povlaku lze pozorovat podélné trhliny v oblasti pod povrchem (obr. 43 a). Příčina jejich vzniku není zřejmá, může se jednat o důsledek rozdílné teplotní roztažnosti karbidických částic a kovové matrice. Tyto trhliny jsou značně nežádoucí a mohou snižovat kohezní pevnost povlaku a následně zvyšovat míru opotřebení, což také dokládá zkouška opotřebení dle ASTM G-65 a G-133. Mikrostruktura je také tvořena póry, karbidickými částicemi a kovovou maticí, obdobně jako v případě neovlivněného povlaku. Pomocí analýzy EDX bylo zjištěno prvkové složení v jednotlivých částech, které je uvedeno v Tab. 12. Tmavě šedá oblast (1) představuje karbid chromu Cr_3C_2 , popřípadě Cr_7C_3 . Světle šedá oblast (2) reprezentuje matici se zvýšeným obsahem Cr a C vlivem rozpuštění karbidů při nástřiku, zatímco světlé oblasti (3) představují původní matici povlaku. Na snímku lze také pozorovat počátky opětovné precipitace karbidu z přesyceného roztoku matrice vlivem tepelného zpracování laserem.



Obr. 43 - Snímky z SME ovlivněného nástřiku. Zvětšení: a) - 200x, b) - 1000x, c) - 3000x, d) - 6000x

Tab. 12 - Chemické složení ovlivněného nástřiku měřené pomocí EDX analýzy.

	C [%]	Cr [%]	Co [%]	Ni [%]	Al [%]
Místo měření: 1	16,39	81,81	1,18	0,62	-
Místo měření: 2	12,11	65,59	14,29	8,01	-
Místo měření: 3	11,68	18,91	22,22	39,72	7,47

11.1.3. Přetavený nástřik

Mikrostruktura přetaveného povlaku je znázorněna na obr. 44. Při těchto procesních parametrech došlo k roztavení povlaku, který se částečně smísil se základním materiálem. Na snímku lze pozorovat vznik mezivrstvy mezi povlakem a základním materiálem, kde došlo ke smísení povlaku s železem (obr. 44 c, e).

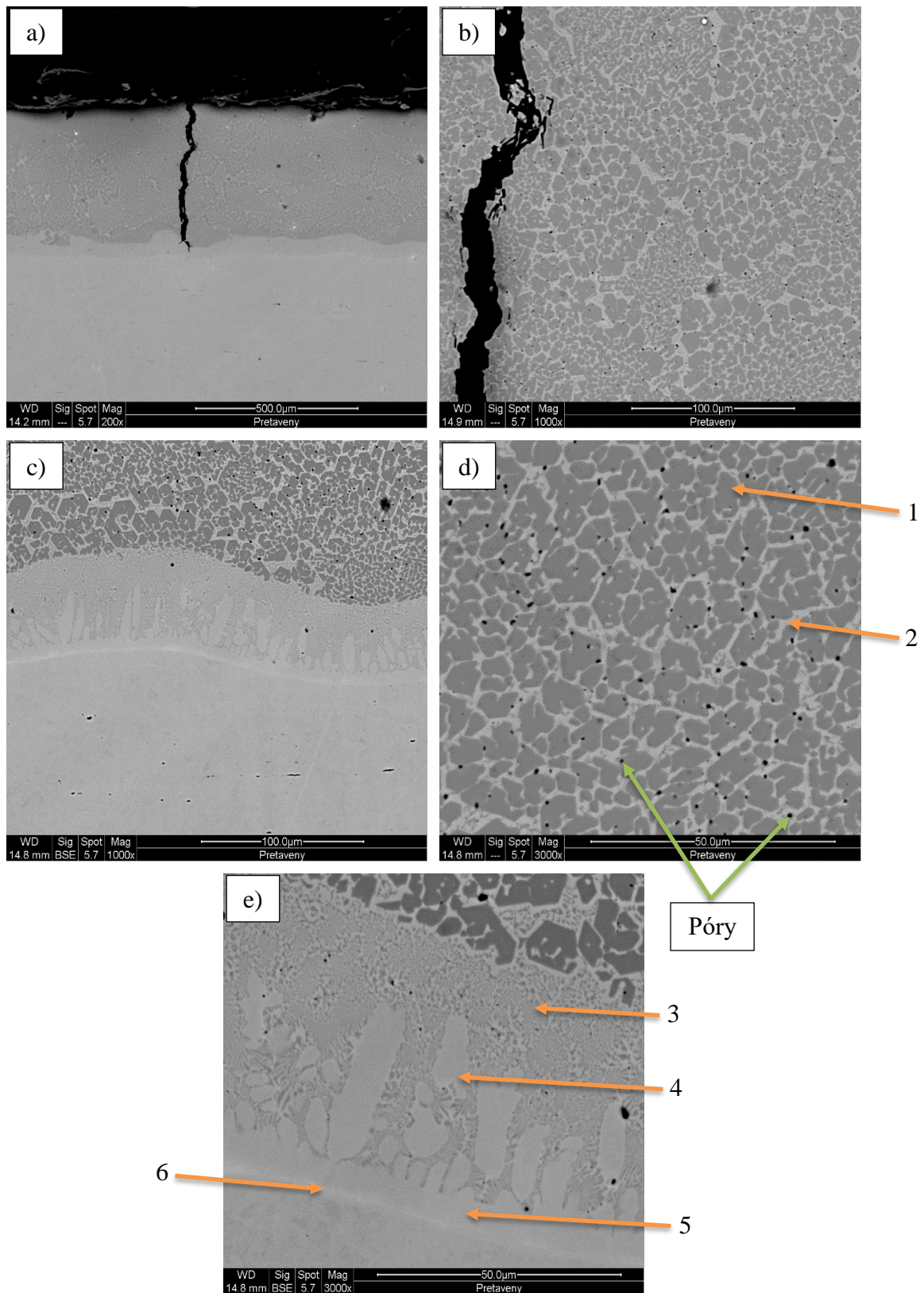
Vlivem velkého tahového pnutí při rychlém tuhnutí přetaveného povlaku došlo k tvorbě příčných prasklin (Obr. 44 b). Oproti povlaku neovlivněnému a ovlivněnému lze pozorovat významný úbytek pórů a úplné eliminaci hranic jednotlivých splatů. Na snímcích lze proto vidět jen malé mikropóry, jevící se jako černé malé útvary (Obr. 44 d).

Pomocí analýzy EDX bylo zjištěno prvkové složení v jednotlivých částích, které je uvedeno v Tab. 13. Tmavě šedé oblasti (1) jsou bohaté na uhlík, chrom a železo.

Světlejší fáze mezi FeCrC fází obsahuje větší množství Fe pocházejícího ze substrátu, které se do materiálu povlaku přimísilo během laserového přetavení. Množství Fe se zvyšuje v oblasti mezivrstvy směrem k substrátu, zatímco prvků pocházejících z povlaku ubývá (obr. 44 e, Tab. 13).

Tab. 13 - Chemické složení přetaveného nástřiku měřené pomocí EDX analýzy.

	C [%]	Cr [%]	Fe [%]	Co [%]	Ni [%]
Místo měření: 1	14,12	58,88	23,01	2,82	1,16
Místo měření: 2	8,84	23,04	46,19	10,42	11,51
Místo měření: 3	7,74	19,51	65,50	3,76	3,49
Místo měření: 4	5,67	10,62	75,92	3,94	3,85
Místo měření: 5	5,30	8,05	80,35	3,14	3,16
Místo měření: 6	5,58	3,51	88,16	1,47	1,28



Obr. 44 - Snímky z SME přetaveného nástřiku. Zvětšení: a) - 200x, b) - 1000x, c) - 1000x
d) - 3000x, e) - 3000x

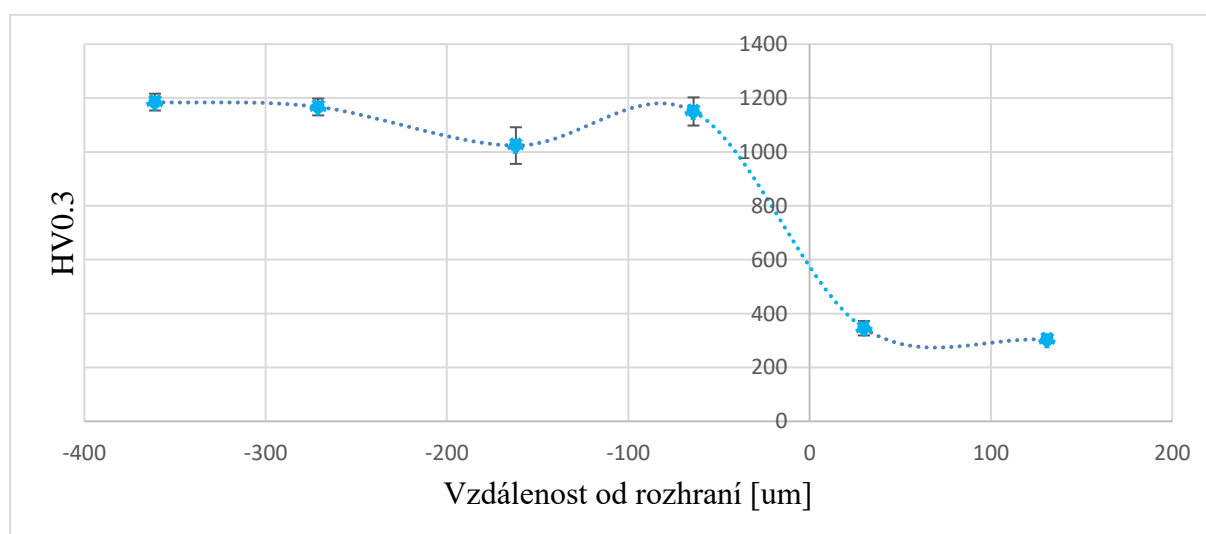
12. Hodnocení průběhu mikrotvrdosti HV0,3

12.1. Neovlivněný nástřik

Naměřené hodnoty mikrotvrdosti neovlivněného nástřiku jsou uvedeny v Tab. 14 a v grafu na Obr. 45.

Tab. 14 - Naměřené hodnoty mikrotvrdosti pro neovlivněný nástřik.

Vtisk	a ₁	a ₂	HV0,3	Průměrná hodnota	Směrodatná odchylka	Hloubka od povrchu
[-]	[um]	[um]	[HV0,3]	[HV0,3]	[-]	[um]
1	22	22	1148	1184	31	77
2	22	21	1202			
3	22	21	1202			
4	21	22	1202	1166	31	167
5	22	22	1148			
6	22	22	1148			
7	24	24	965	1023	68	276
8	23	24	1006			
9	23	22	1098			
10	22	21	1202	1149	52	374
11	22	22	1148			
12	23	22	1098			
13	40	41	339	345	27	468
14	38	39	375			
15	42	41	323			
16	42	42	315	303	11	569
17	44	42	301			
18	43	44	294			



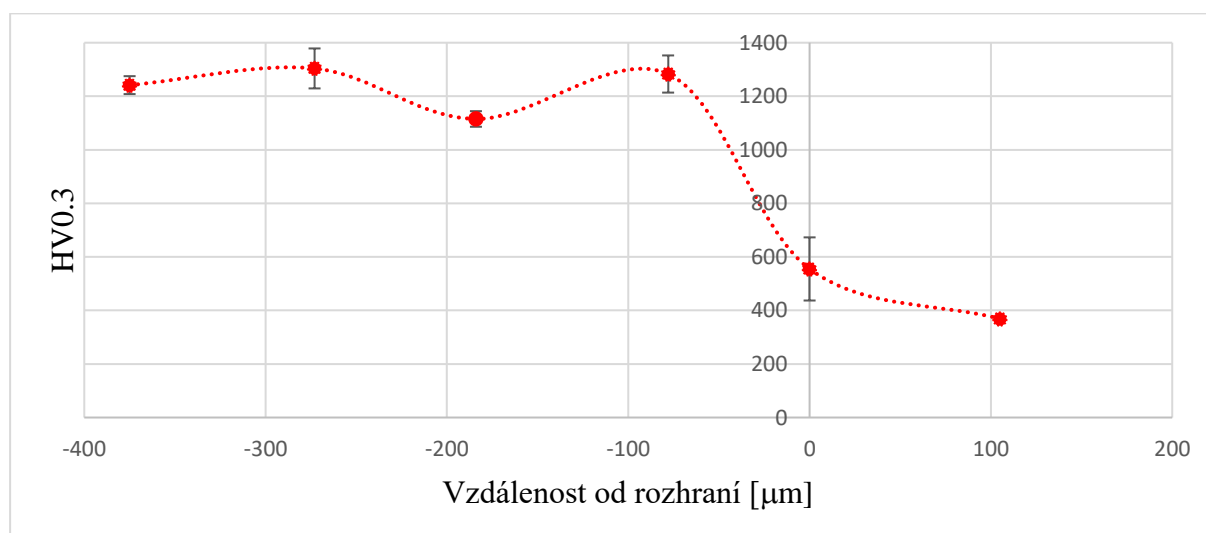
Obr. 45 - Průběh mikrotvrdosti pro neovlivněný nástřik v závislosti na vzdálenosti od povrchu.

12.2. Ovlivněný nástřik

Naměřené hodnoty mikrotvrdosti ovlivněného nástřiku jsou uvedeny v Tab. 15 a v grafu na Obr. 46.

Tab. 15 - Naměřené hodnoty mikrotvrdosti pro ovlivněný nástřik.

Vtisk	a ₁	a ₂	HV0,3	Průměrná hodnota	Směrodatná odchylka	Hloubka od povrchu
[-]	[um]	[um]	[HV0,3]	[HV0,3]	[-]	[um]
1	21	22	1203	1242	33	48
2	22	20	1261			
3	21	21	1261			
4	20	22	1261	1304	75	150
5	21	21	1261			
6	20	20	1390			
7	23	22	1098	1115	29	239
8	23	22	1098			
9	21	23	1149			
10	20	21	1323	1283	69	345
11	21	22	1203			
12	21	20	1323			
13	36	34	454	555	118	423
14	33	32	526			
15	28	29	685			
16	38	40	366	369	6	528
17	39	38	375			
18	38	40	366			



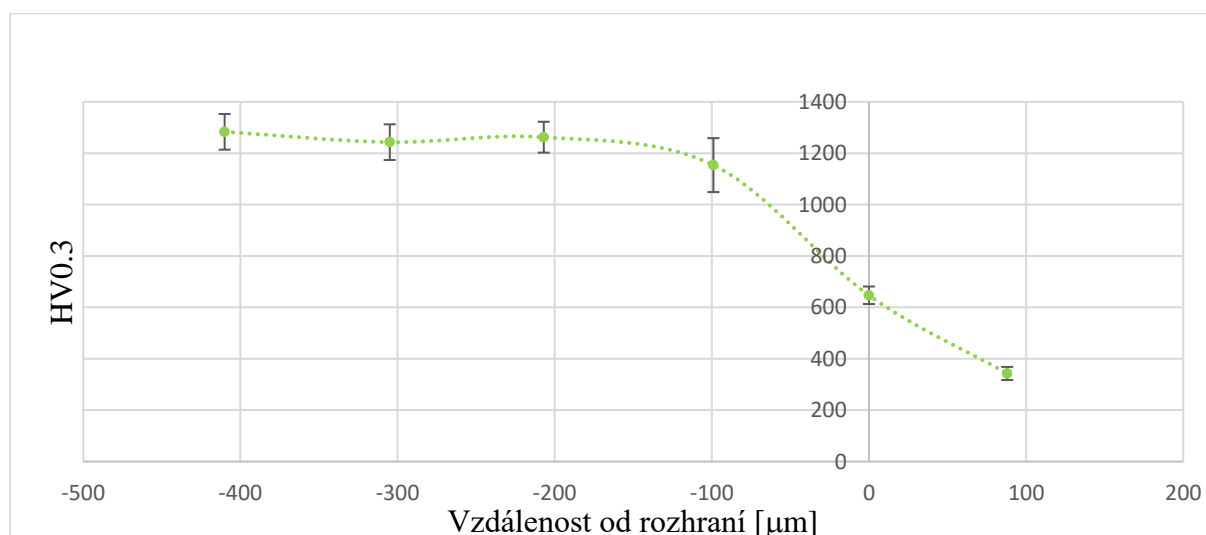
Obr. 46 - Průběh mikrotvrdosti pro ovlivněný nástřik v závislosti na vzdálenosti od povrchu.

12.3. Přetavený nástřík

Naměřené hodnoty mikrotvrdosti přetaveného nástříku jsou uvedeny v Tab. 16 a v grafu na Obr. 47.

Tab. 16 - Naměřené hodnoty mikrotvrdosti pro přetavený nástřík.

Vtisk	a ₁	a ₂	HV0,3	Průměrná hodnota	Směrodatná odchylka	Hloubka od povrchu
[-]	[um]	[um]	[HV0,3]	[HV0,3]	[-]	[um]
1	20	21	1323	1283	69	93
2	21	20	1323			
3	21	22	1203			
4	22	21	1203	1243	69	198
5	20	21	1323			
6	22	21	1203			
7	21	22	1261	1267	60	296
8	22	20	1149			
9	21	20	1390			
10	21	21	1261	1154	105	404
11	22	22	1149			
12	24	22	1051			
13	30	29	639	647	34	503
14	30	30	618			
15	28	29	685			
16	42	42	315	343	26	591
17	39	39	366			
18	40	40	348			



Obr. 47 - Průběh mikrotvrdosti pro přetavený nástřík v závislosti na vzdálenosti od povrchu.

13. Hodnocení opotřebení dle ASTM G-133

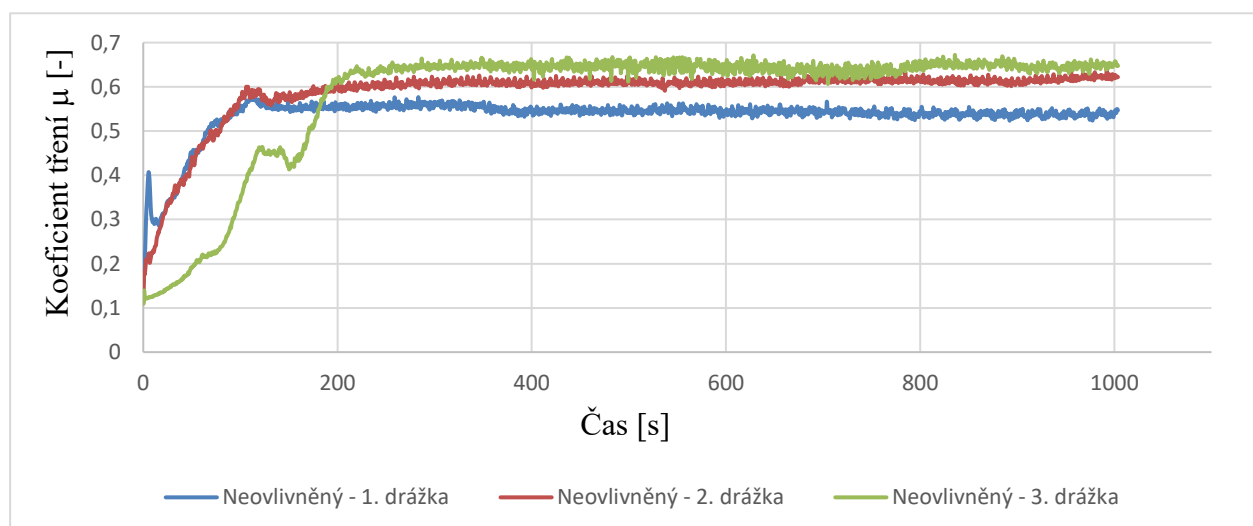
13.1. Neovlivněný nástřik

Jednotlivé hodnoty z měření jsou zobrazeny v Tab. 17. Výsledná maximální hodnota hloubky stopy po opotřebení činí $2,7 \pm 0,5 \mu\text{m}$ a průměrná hodnota množství odebraného materiálu je $(6,36 \pm 1,00) \cdot 10^{-3} \text{ mm}^3$.

Tab. 17 - Výsledné hodnoty měření drážky pomocí profilometru pro neovlivněný povlak.

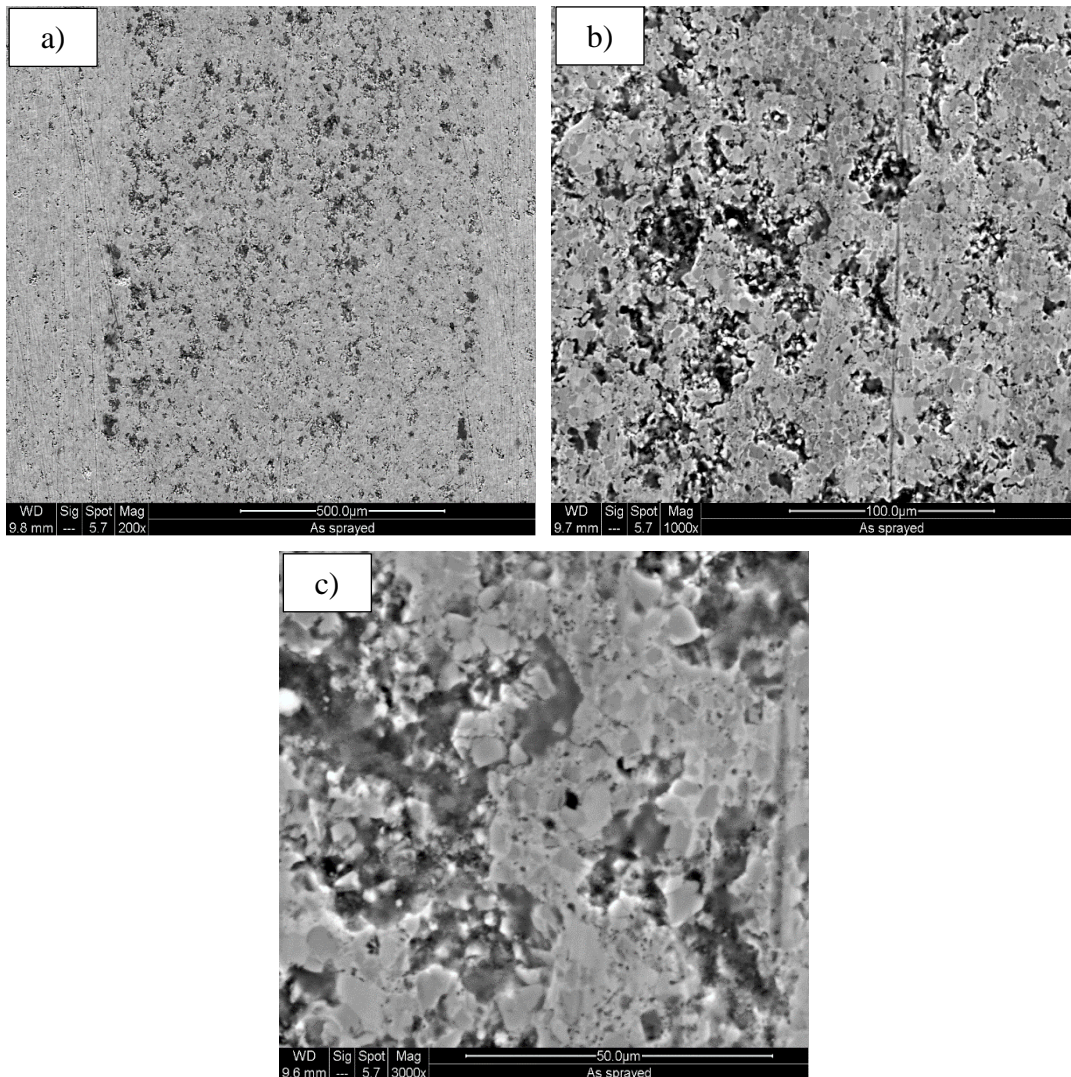
Měření	Hloubka	Plocha	Odebraný objem
[-]	[μm]	[μm^2]	[mm^3]
1. Drážka – 25%	3,3	538	$5,38 \cdot 10^{-3}$
1. Drážka – 50%	2,3	667	$6,67 \cdot 10^{-3}$
1. Drážka – 75%	2,8	709	$7,09 \cdot 10^{-3}$
2. Drážka – 25%	2,1	490	$4,90 \cdot 10^{-3}$
2. Drážka – 50%	2,9	755	$7,55 \cdot 10^{-3}$
2. Drážka – 75%	2,5	720	$7,20 \cdot 10^{-3}$
3. Drážka – 25%	2,1	502	$5,02 \cdot 10^{-3}$
3. Drážka – 50%	3,1	598	$5,98 \cdot 10^{-3}$
3. Drážka – 75%	3,5	748	$7,48 \cdot 10^{-3}$
Průměr	2,7	636	$6,36 \cdot 10^{-3}$
Směrodatná odchylka	0,5	100	$1,00 \cdot 10^{-3}$

Při zkoušce opotřebení byla taktéž zaznamenána hodnota koeficientu tření μ v závislosti na čase, viz Obr. 48.



Obr. 48 - Průběh koeficientu tření v závislosti na čase pro HVOF nástřik.

Na obr. 49 je znázorněna morfologie povrchu po opotřebení neovlivněného nástřiku. Vlivem pohybu ocelové kuličky po povrchu došlo k uvolňování jednotlivých karbidických částic. Lze pozorovat i ojedinělé abrazivní opotřebení, způsobené zřejmě uvolněnou karbidickou částicí, zachycenou během pohybu mezi povrchem a ocelovou kuličku (Obr. 49 c)



Obr. 49 - Morfologie opotřebení neovlivněného nástřiku po testu dle ASTM G-133.
Zvětšení: a) - 200x, b) - 1000x, c) - 3000x

Koeficient opotřebení: $2,5 \cdot 10^{-6} \pm 7,8 \cdot 10^{-8} [\text{mm}^3 \cdot \text{N}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}]$
Rychlost opotřebení: $6,4 \cdot 10^{-5} \pm 1,9 \cdot 10^{-6} [\text{mm}^3 \cdot \text{m}^{-1}]$
Odebraný objem: $6,36 \cdot 10^{-3} \pm 1,90 \cdot 10^{-4} [\text{mm}^3]$
Ustálená hodnota μ ¹⁷: $0,600 \pm 0,042$

¹⁷ Ustálená hodnota μ byla změřena jako průměrná hodnota μ třech drážek v čase 200 – 1000 s.

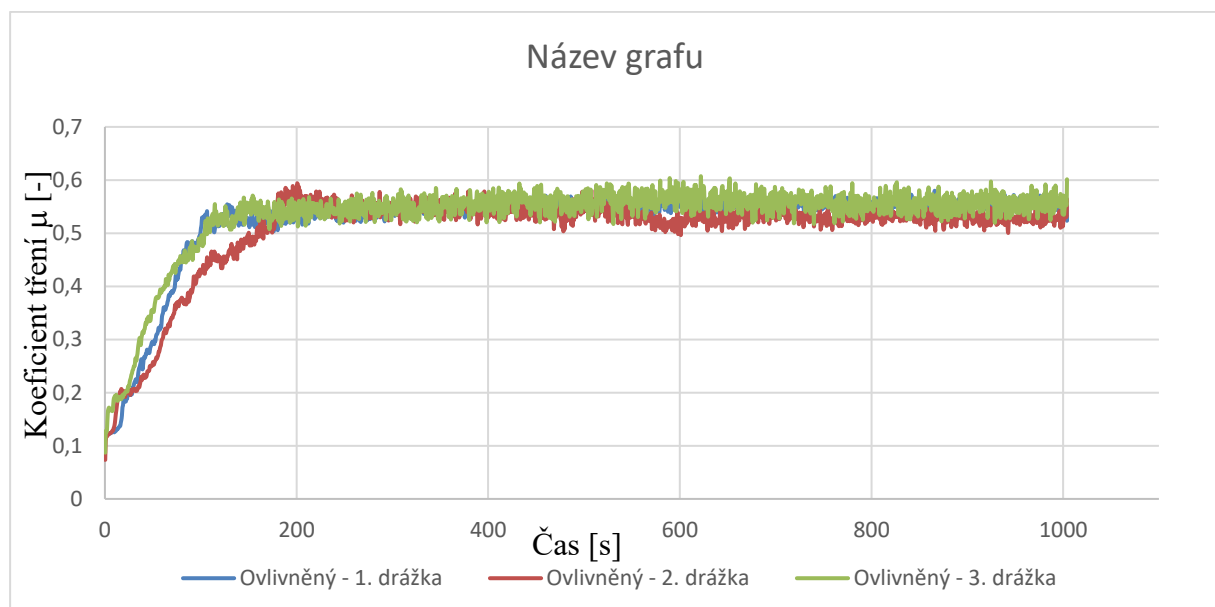
13.2. Ovlivněný nástřik

Jednotlivé hodnoty z měření jsou zobrazeny v Tab. 18. Výsledná maximální hodnota hloubky drážky činí $2,5 \pm 1,6 \mu\text{m}$ a průměrná hodnota množství odebraného materiálu je $(4,84 \pm 1,07) \cdot 10^{-3} \text{mm}^3$.

Tab. 18 - Výsledné hodnoty měření drážky pomocí profilometru pro ovlivněný povlak.

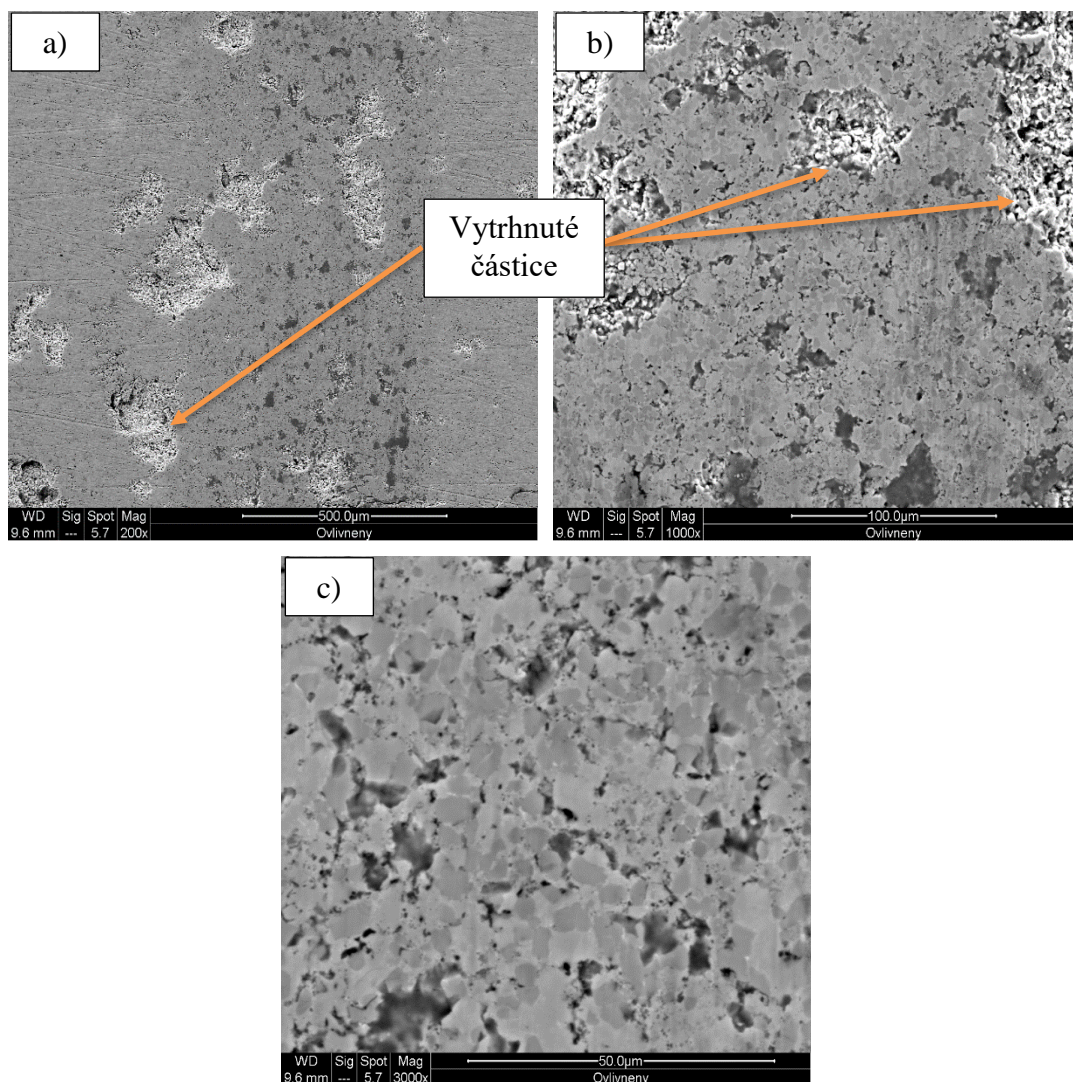
Měření	Hloubka	Plocha	Odebraný objem
[-]	[μm]	[μm^2]	[mm^3]
1. Drážka – 25%	3,5	516	$5,16 \cdot 10^{-3}$
1. Drážka – 50%	1,8	451	$4,51 \cdot 10^{-3}$
1. Drážka – 75%	2,3	655	$6,55 \cdot 10^{-3}$
2. Drážka – 25%	6,5	555	$5,55 \cdot 10^{-3}$
2. Drážka – 50%	1,4	260	$2,60 \cdot 10^{-3}$
2. Drážka – 75%	1,1	403	$4,03 \cdot 10^{-3}$
3. Drážka – 25%	1,5	570	$5,70 \cdot 10^{-3}$
3. Drážka – 50%	3,0	510	$5,10 \cdot 10^{-3}$
3. Drážka – 75%	1,8	438	$4,38 \cdot 10^{-3}$
Průměr	2,5	484	$4,84 \cdot 10^{-3}$
Směrodatná odchylka	1,6	107	$1,07 \cdot 10^{-3}$

Při zkoušce opotřebení byla taktéž zaznamenána hodnota koeficientu tření μ v závislosti na čase, viz Obr. 50.



Obr. 50 - Průběh koeficientu tření v závislosti na čase pro ovlivněný nástřik.

Na obr. 51 je znázorněna morfologie povrchu po opotřebení ovlivněného nástřiku. Vlivem přítomnosti podpovrchových trhlin docházelo k uvolňování větších částí povlaku (Obr. 51 a, b), avšak karbidické částice, zabudované v matrici, vykazují vyšší míru odolnosti proti uvolňování při namáhání vzájemným oscilačním pohybem kuličky a povrchu (Obr. 51 c).



Obr. 51 - Morfologie opotřebení ovlivněného nástřiku po testu dle ASTM G-133. Zvětšení:
a) - 200x, b) - 1000x, c) - 3000x

Koeficient opotřebení: $1,9 \cdot 10^{-6} \pm 1,1 \cdot 10^{-7} [\text{mm}^3 \cdot \text{N}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}]$
Rychlost opotřebení: $4,8 \cdot 10^{-5} \pm 2,7 \cdot 10^{-6} [\text{mm}^3 \cdot \text{m}^{-1}]$
Odebraný objem: $4,84 \cdot 10^{-3} \pm 2,70 \cdot 10^{-4} [\text{mm}^3]$
Ustálená hodnota μ : $0,548 \pm 0,016$

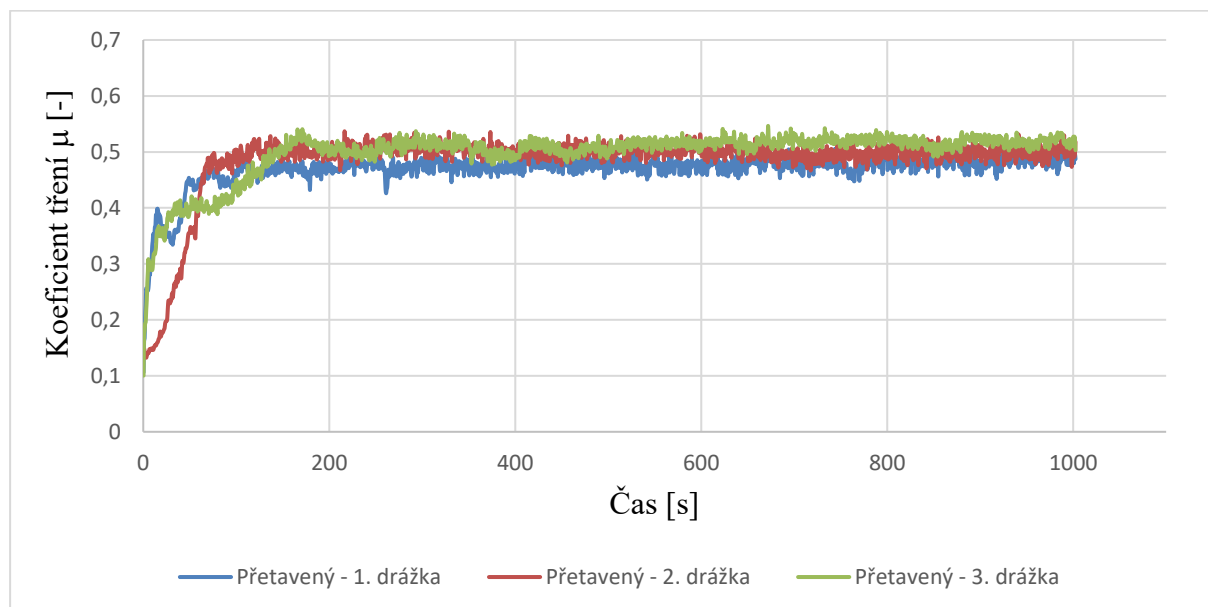
13.3. Přetavený nástřik

Jednotlivé hodnoty z měření jsou zobrazeny v Tab. 19. Výsledná maximální hodnota hloubky drážky činí $3,2 \pm 0,8 \mu\text{m}$ a průměrná hodnota množství odebraného materiálu je $(5,72 \pm 1,96) \cdot 10^{-3} \text{ mm}^3$.

Tab. 19 - Výsledné hodnoty měření drážky pomocí profilometru pro přetavený povlak.

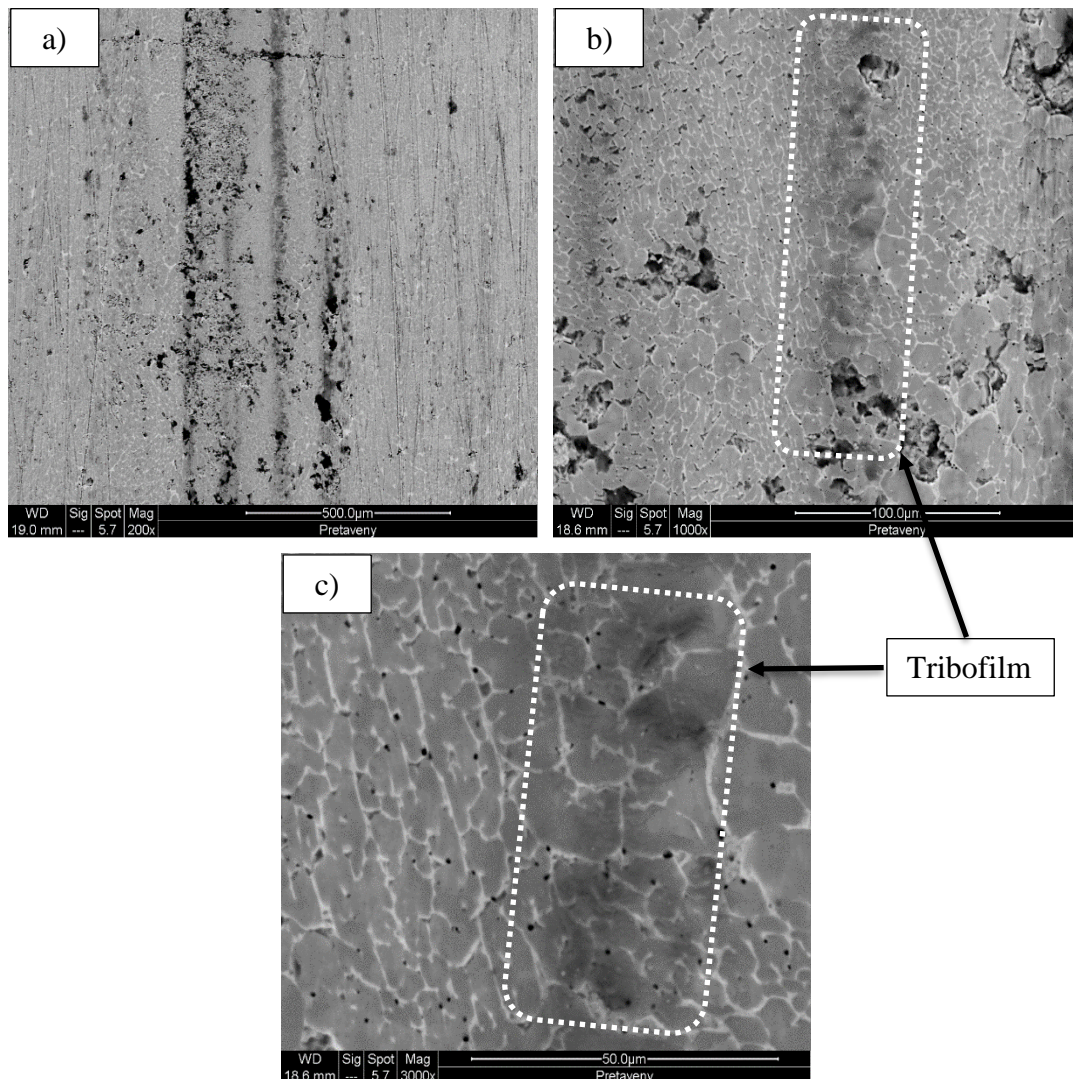
Měření	Hloubka	Plocha	Odebraný
[-]	[μm]	[μm^2]	[mm^3]
1. Drážka – 25%	3,2	445	$4,45 \cdot 10^{-3}$
1. Drážka – 50%	5,0	669	$6,69 \cdot 10^{-3}$
1. Drážka – 75%	3,6	632	$6,32 \cdot 10^{-3}$
2. Drážka – 25%	2,4	380	$3,80 \cdot 10^{-3}$
2. Drážka – 50%	2,9	417	$4,17 \cdot 10^{-3}$
2. Drážka – 75%	3,4	539	$5,39 \cdot 10^{-3}$
3. Drážka – 25%	4,0	1070	$1,07 \cdot 10^{-2}$
3. Drážka – 50%	2,0	481	$4,81 \cdot 10^{-3}$
3. Drážka – 75%	2,7	511	$5,11 \cdot 10^{-3}$
Průměr	3,2	572	$5,72 \cdot 10^{-3}$
Směrodatná odchylka	0,8	196	$1,96 \cdot 10^{-3}$

Při zkoušce opotřebení byla taktéž zaznamenána hodnota koeficientu tření μ v závislosti na čase, viz Obr. 52.



Obr. 52 - Průběh koeficientu tření v závislosti na čase pro přetavený nástřik.

Na obr. 53 je znázorněna morfologie povrchu po opotřebení přetaveného nástřiku. Oproti ovlivněnému povlaku nedocházelo k uvolnění větších částic povlaku. Dominantním mechanismem je plastická deformace a adhezivní opotřebení. Ve stopě po opotřebení lze pozorovat vznik tribofilmu (Obr. 53 b, c). Tribofilm vzniká oxidací kovových fází z opotřebovaných částic materiálu povlaku a ocelové kuličky. Lze předpokládat obsah oxidů Fe, pocházející z chromové oceli protikusy, avšak tuto domněnku je nutné ověřit pomocí EDS analýzy.



Obr. 53 - Morfologie opotřebení přetaveného nástřiku po testu dle ASTM G-133. Zvětšení: a) - 200x, b) - 1000x, c) - 3000x

Koeficient opotřebení: $2,3 \cdot 10^{-6} \pm 3,6 \cdot 10^{-7} [\text{mm}^3 \cdot \text{N}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}]$

Rychlost opotřebení: $5,7 \cdot 10^{-5} \pm 8,9 \cdot 10^{-6} [\text{mm}^3 \cdot \text{m}^{-1}]$

Odebraný objem: $5,71 \cdot 10^{-3} \pm 8,90 \cdot 10^{-4} [\text{mm}^3]$

Ustálená hodnota μ : $0,497 \pm 0,018$

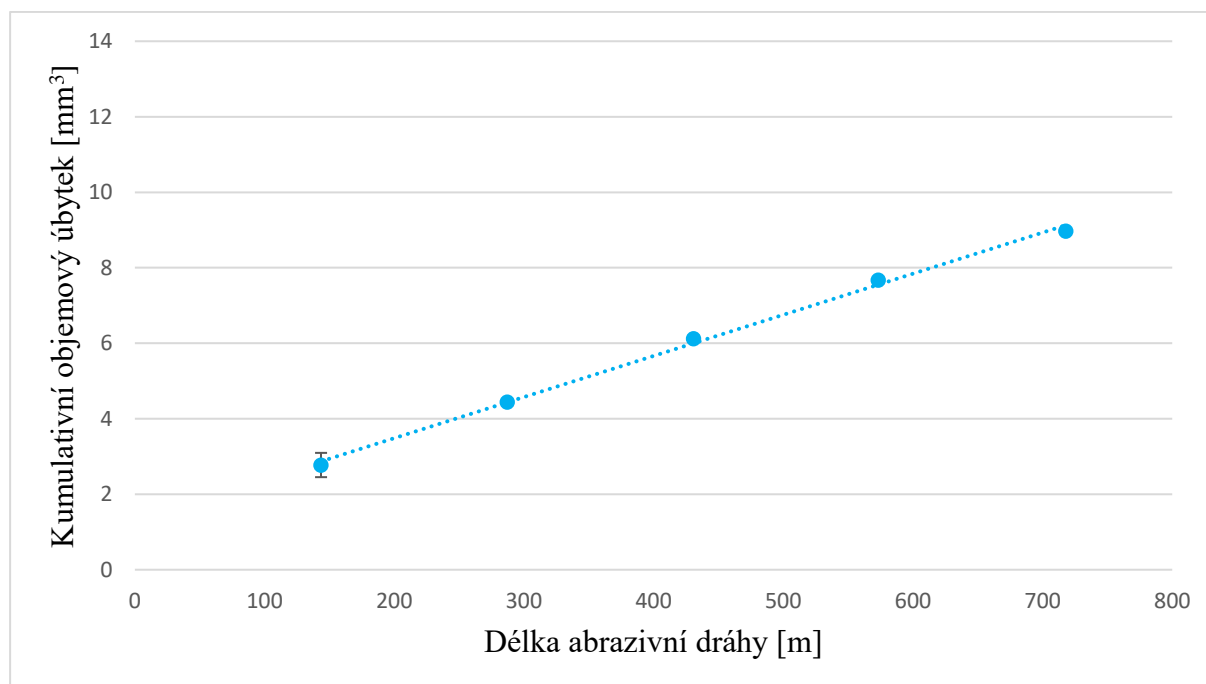
14. Analýza změn opotřebení dle ASTM G-65

14.1. Neovlivněný nástřik

Jednotlivé hodnoty z měření jsou zobrazeny v Tab. 20. Výsledná kumulativní objemový úbytek činí $8,9738 \pm 0,0039 \text{ mm}^3$. Na obr. 54 lze vidět závislost kumulativního objemového úbytku na délce abrazivní dráhy.

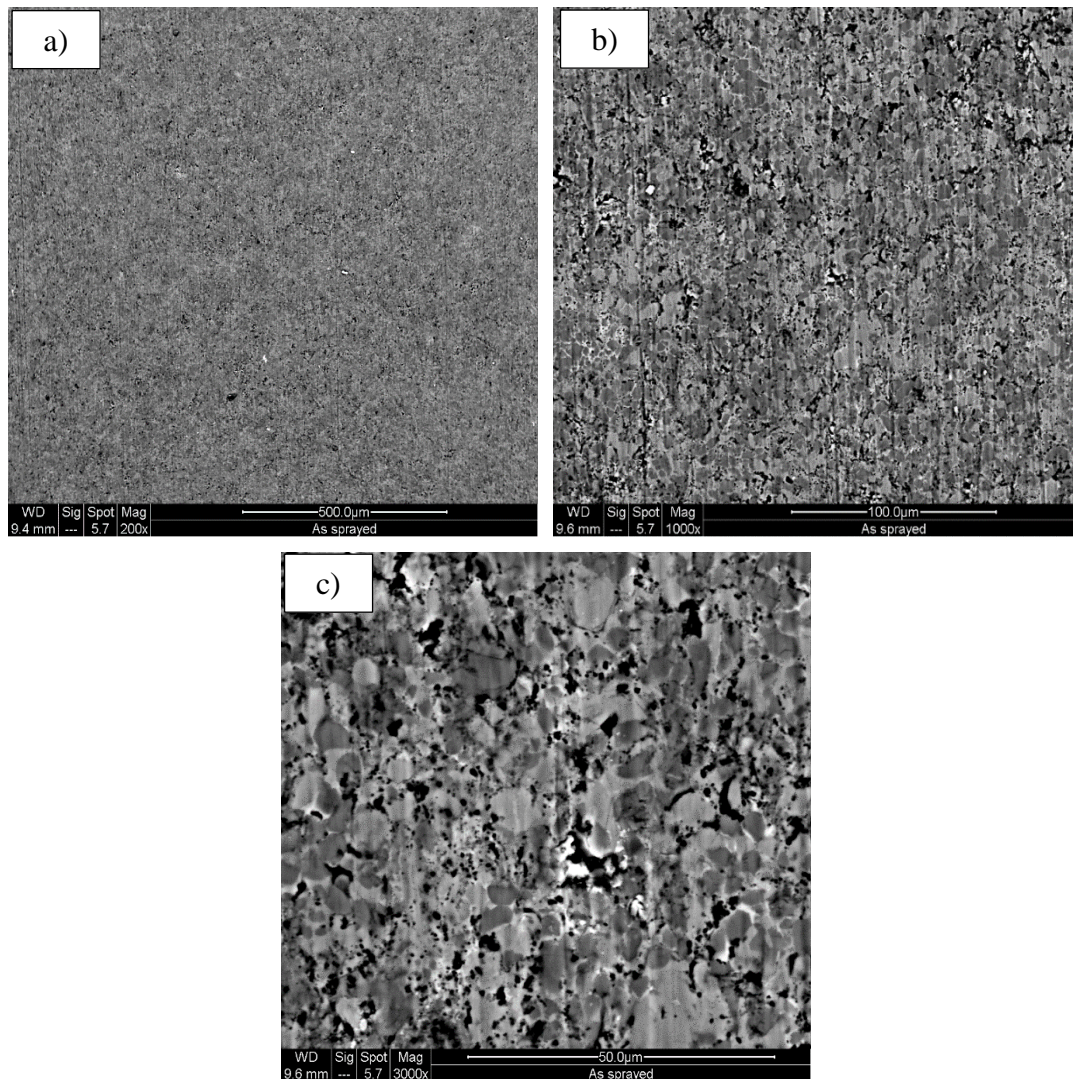
Tab. 20 - Výsledné hodnoty měření testu dle ASTM G-65 pro neovlivněný nástřik.

Č. cyklu	Dráha	Rozdíl hmotností	Kumulativní objemový úbytek
[-]	[m]	[g]	[mm ³]
1	143,6	$0,0180 \pm 0,0060$	$2,7739 \pm 0,3214$
2	287,2	$0,0108 \pm 0,0002$	$4,4406 \pm 0,0309$
3	430,8	$0,0109 \pm 0,0000$	$6,1188 \pm 0,0039$
4	573,4	$0,0101 \pm 0,0001$	$7,6736 \pm 0,0116$
5	718	$0,0084 \pm 0,0000$	$8,9738 \pm 0,0039$



Obr. 54 - Závislost kumulativního objemového úbytku na délce abrazivní dráhy pro neovlivněný vzorek.

Na obr. 55 je znázorněna morfologie povrchu po opotřebení neovlivněného nástřiku. Na snímcích lze vidět, že nedošlo k uvolnění větších částic. Jsou zde vidět příčné stopy, které jsou způsobeny vlivem abrazivních částic korundu.



Obr. 55 - Morfologie opotřebení neovlivněného nástřiku po testu dle ASTM G-65. Zvětšení:
a) - 200x, b) - 1000x, c) - 3000x

Koeficient opotřebení: $(568 \pm 207) \cdot 10^{-6} [\text{mm}^3 \cdot \text{N}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}]$

Rychlost opotřebení: $(125 \pm 46) \cdot 10^{-4} [\text{mm}^3 \cdot \text{m}^{-1}]$

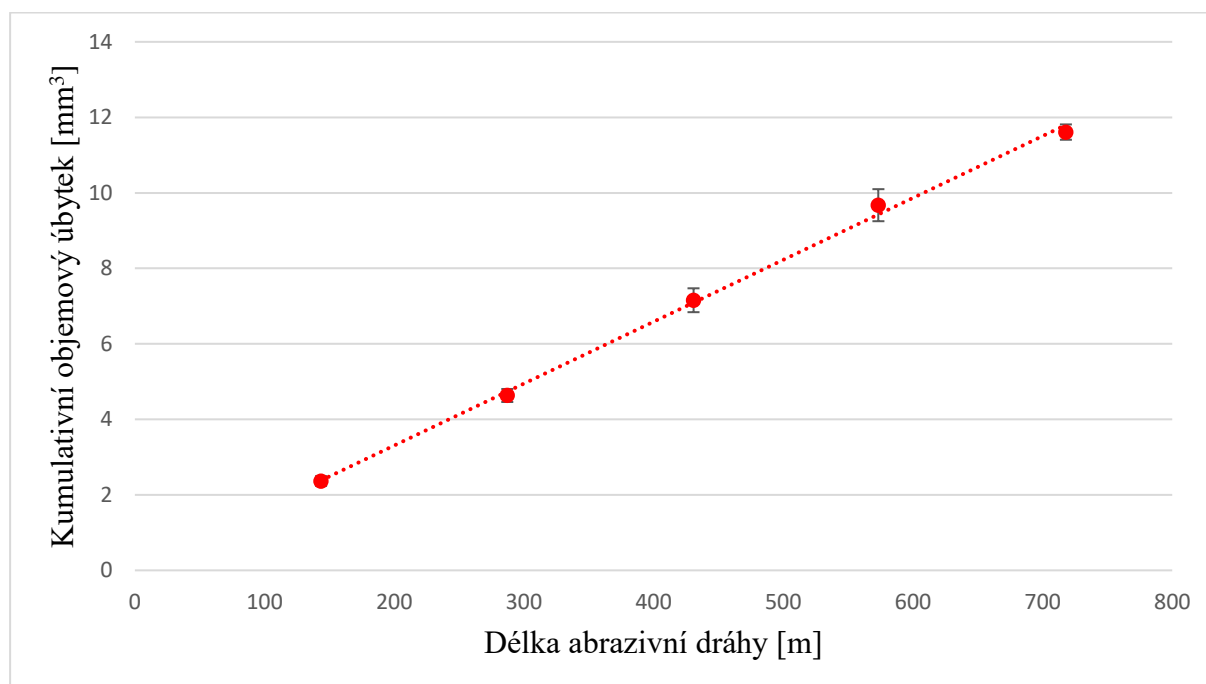
Odebraný objem: $8,9738 \pm 0,0039 [\text{mm}^3]$

14.2. Ovlivněný nástřik

Jednotlivé hodnoty z měření jsou zobrazeny v Tab. 21. Výsledný kumulativní objemový úbytek činí $11,6101 \pm 0,2032 \text{ mm}^3$. Na obr. 56 lze vidět závislost kumulativního objemového úbytku na délce abrazivní dráhy.

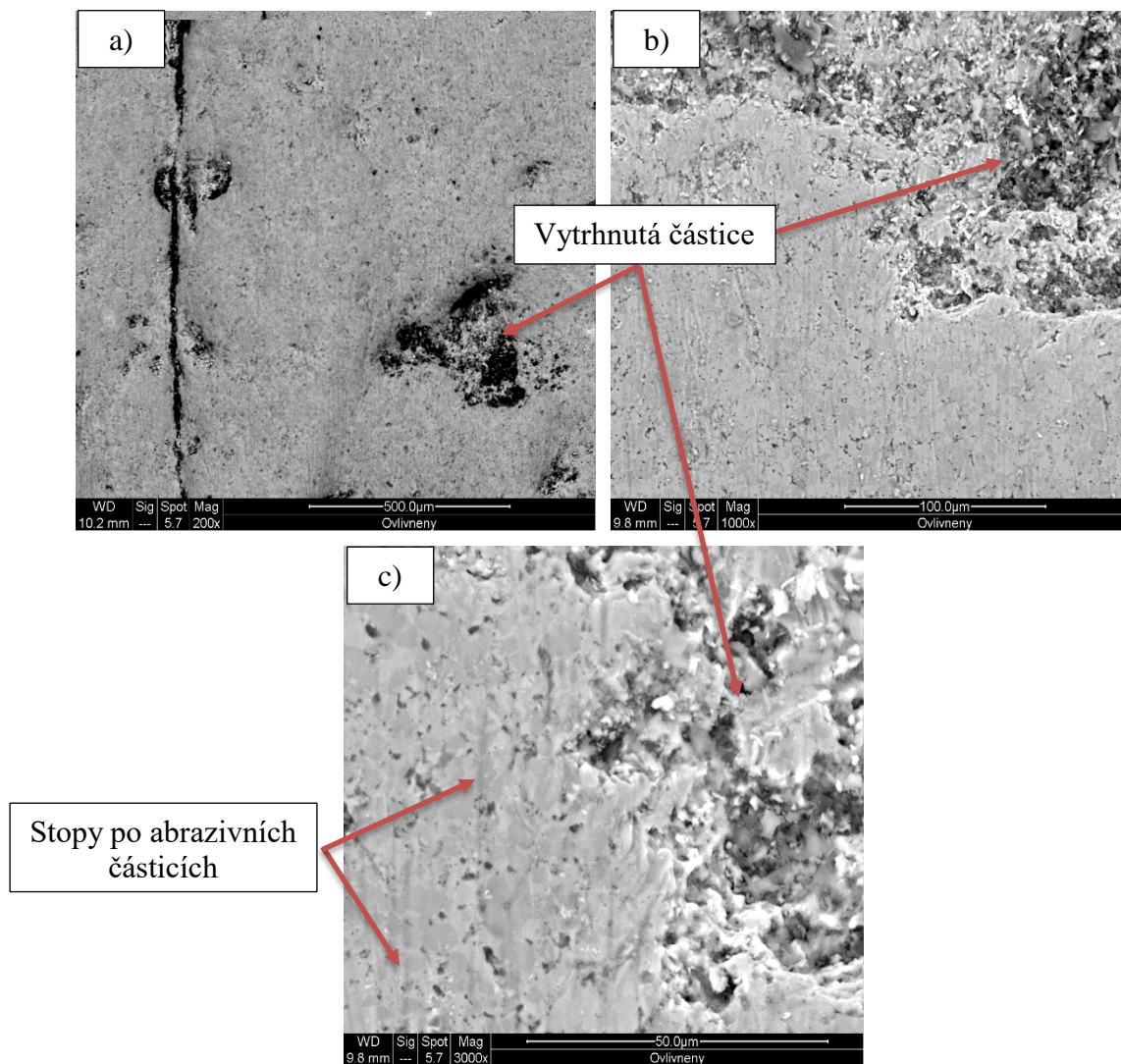
Tab. 21 - Výsledné hodnoty měření testu dle ASTM G-65 pro ovlivněný nástřik.

Č. cyklu	Dráha	Rozdíl hmotností	Kumulativní objemový úbytek
[-]	[m]	[g]	[mm ³]
1	143,6	$0,0153 \pm 0,0008$	$2,3663 \pm 0,1286$
2	287,2	$0,0147 \pm 0,0011$	$4,6322 \pm 0,1723$
3	430,8	$0,0164 \pm 0,0020$	$7,1553 \pm 0,3164$
4	573,4	$0,0163 \pm 0,0028$	$9,6734 \pm 0,4244$
5	718	$0,0126 \pm 0,0013$	$11,6101 \pm 0,2032$



Obr. 56 - Závislost kumulativního objemového úbytku na délce abrazivní dráhy pro ovlivněný vzorek.

Na obr. 57 je znázorněna morfologie povrchu po opotřebení ovlivněného nástřiku. Kromě abrazivního opotřebení, podobného opotřebení neovlivněného povlaku, jsou na snímcích jasně patrné uvolňování větších částí povlaků. K těmto delaminacím dochází pravděpodobně v místech podpovrchových trhlin, viz Obr. 43.



Obr. 57 - Morfologie opotřebení ovlivněného nástřiku po testu dle ASTM G-65. Zvětšení:
a) - 200x, b) - 1000x, c) - 3000x

Koeficient opotřebení: $(735 \pm 110) \cdot 10^{-6} [\text{mm}^3 \cdot \text{N}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}]$

Rychlost opotřebení: $(162 \pm 24) \cdot 10^{-4} [\text{mm}^3 \cdot \text{m}^{-1}]$

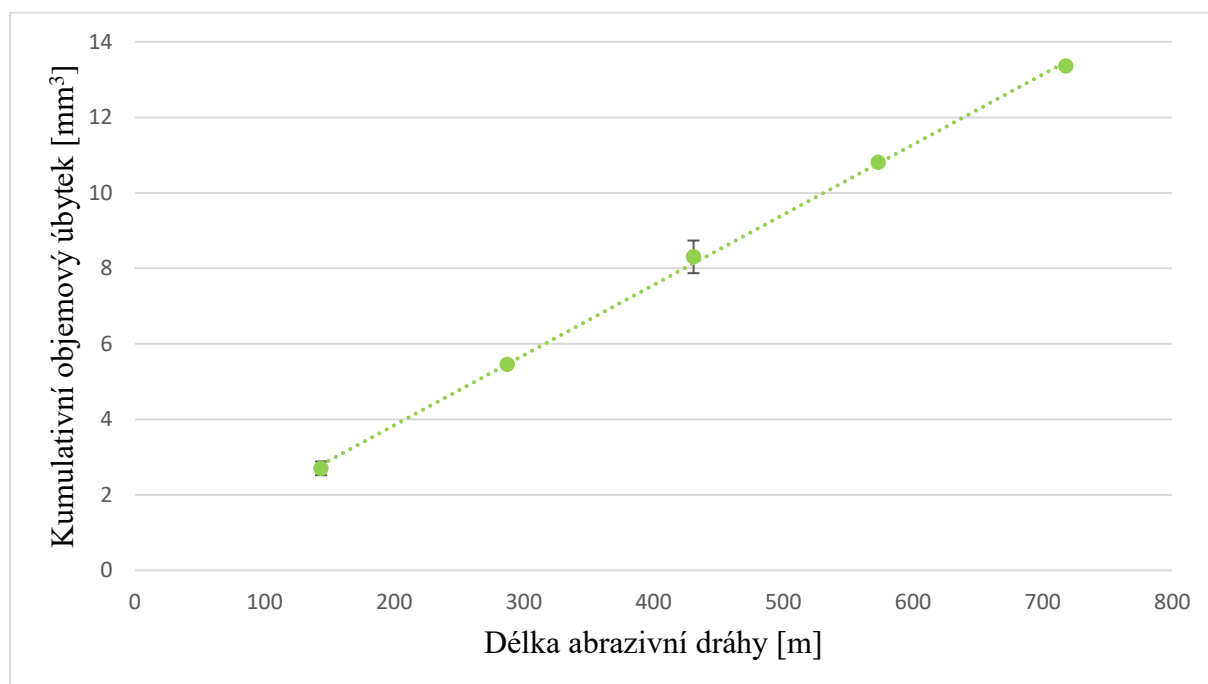
Odebraný objem: $11,6101 \pm 0,2032 [\text{mm}^3]$

14.3. Přetavený nástřik

Jednotlivé hodnoty z měření jsou zobrazeny v Tab. 22. Výsledný kumulativní objemový úbytek činí $13,3616 \pm 0,0257 \text{ mm}^3$. Na obr. 58 lze vidět závislost kumulativního objemového úbytku na délce abrazivní dráhy.

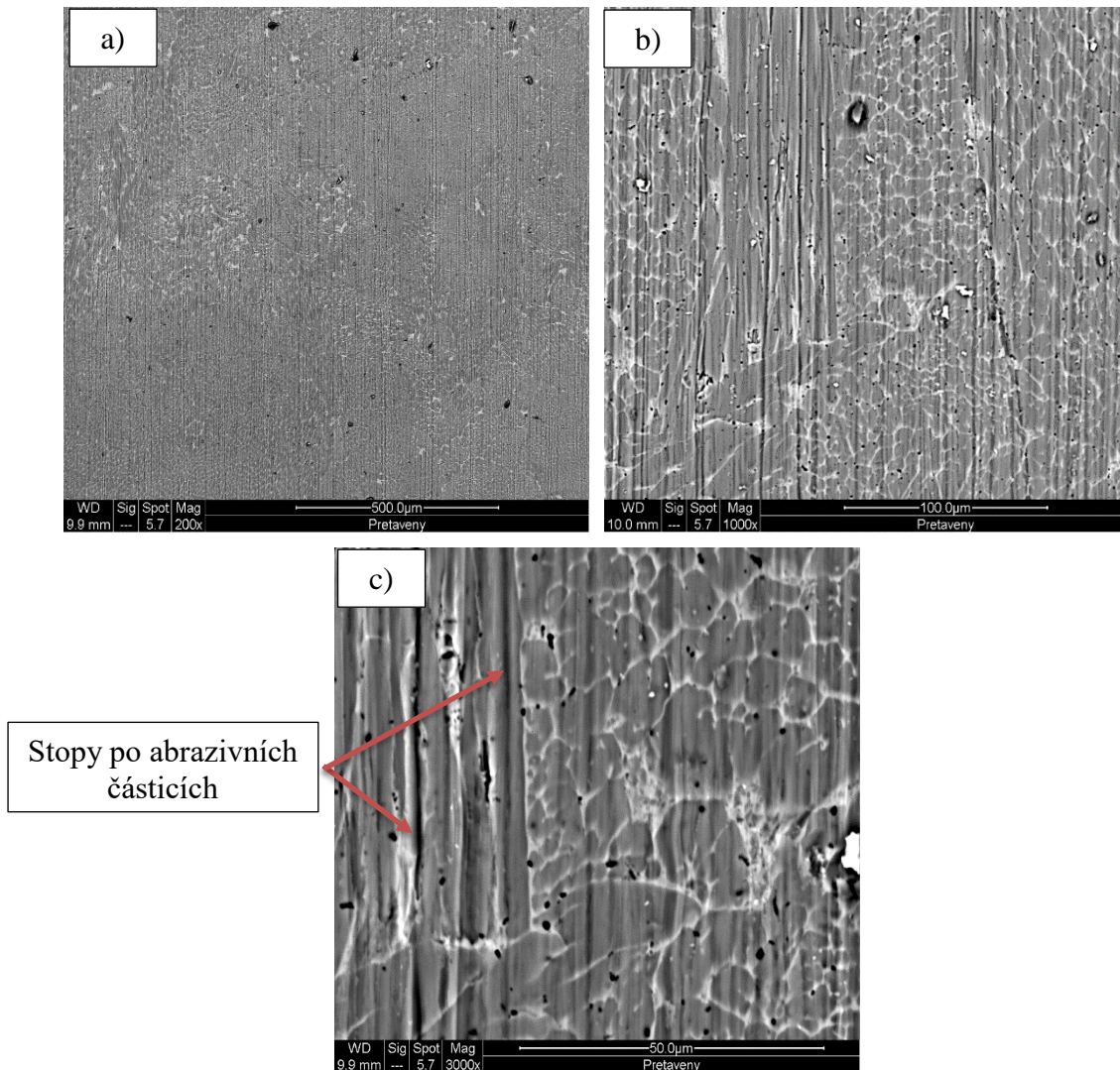
Tab. 22 - Výsledné hodnoty měření testu dle ASTM G-65 pro přetavený nástřik.

Č. cyklu	Dráha	Rozdíl hmotností	Kumulativní objemový úbytek
[-]	[m]	[g]	[mm ³]
1	143,6	$0,0175 \pm 0,0012$	$2,7032 \pm 0,1826$
2	287,2	$0,0179 \pm 0,0004$	$5,4604 \pm 0,0617$
3	430,8	$0,0184 \pm 0,0028$	$8,3050 \pm 0,4321$
4	573,4	$0,0162 \pm 0,0001$	$10,8102 \pm 0,0103$
5	718	$0,0165 \pm 0,0002$	$13,3616 \pm 0,0257$



Obr. 58 - Závislost kumulativního objemového úbytku na délce abrazivní dráhy pro přetavený vzorek.

Na obr. 59 je znázorněna morfologie povrchu po opotřebení přetaveného nástřiku. Opotřeбенý povrch neobsahuje žádné delaminace ani vytržené částice. Jsou patrné pouze výrazné stopy po abrazivní působení částic Al_2O_3 .



Obr. 59 - Morfologie opotřebení přetaveného nástřiku po testu dle ASTM G-65. Zvětšení:
a) - 200x, b) - 1000x, c) - 3000x

Koeficient opotřebení: $(846 \pm 78) \cdot 10^{-6} [\text{mm}^3 \cdot \text{N}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}]$

Rychlost opotřebení: $(186 \pm 17) \cdot 10^{-4} [\text{mm}^3 \cdot \text{m}^{-1}]$

Odebraný objem: $13,3616 \pm 0,0257 [\text{mm}^3]$

15. Diskuze výsledků

Pro experimentální část byla vytvořena matice parametrů pro vytvoření dostatečného spektra vzorků. Tato matice lze rozdělit na dvě hlavní série – série 1 (viz Tab. 8) s názvem přetavený a série 2 (viz Tab. 9) s názvem ovlivněný. Takto modifikované vzorky byly společně s neovlivněným povlakem $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-CoNiCrAlY}$ zkoumány pomocí optické mikroskopie.

Následně byly vybrány parametry pro další část experimentu, viz Tab. 23. Modifikované vzorky byly společně s neovlivněným povlakem $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-CoNiCrAlY}$ zkoumány pomocí SEM. Dále byl změřen průběh mikrotvrdomosti, abrazivní opotřebením dle ASTM-G65 a kluzné opotřebením dle ASTM G-133.

Tab. 23 - Vybrané parametry laserového ovlivněný.

Označení povlaku	V	v	Rozměr svazku X	Rozměr svazku Y	E_h	V_h
[-]	[W]	[$\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$]	[mm]	[mm]	[$\text{W}\cdot\text{mm}^{-2}$]	[$\text{J}\cdot\text{mm}^{-2}$]
Přetavený	1070	2,5	12	1	89,2	35,7
Ovlivněný	750	14,0	12	6	10,4	4,5

15.1. Mikrostruktura povlaků

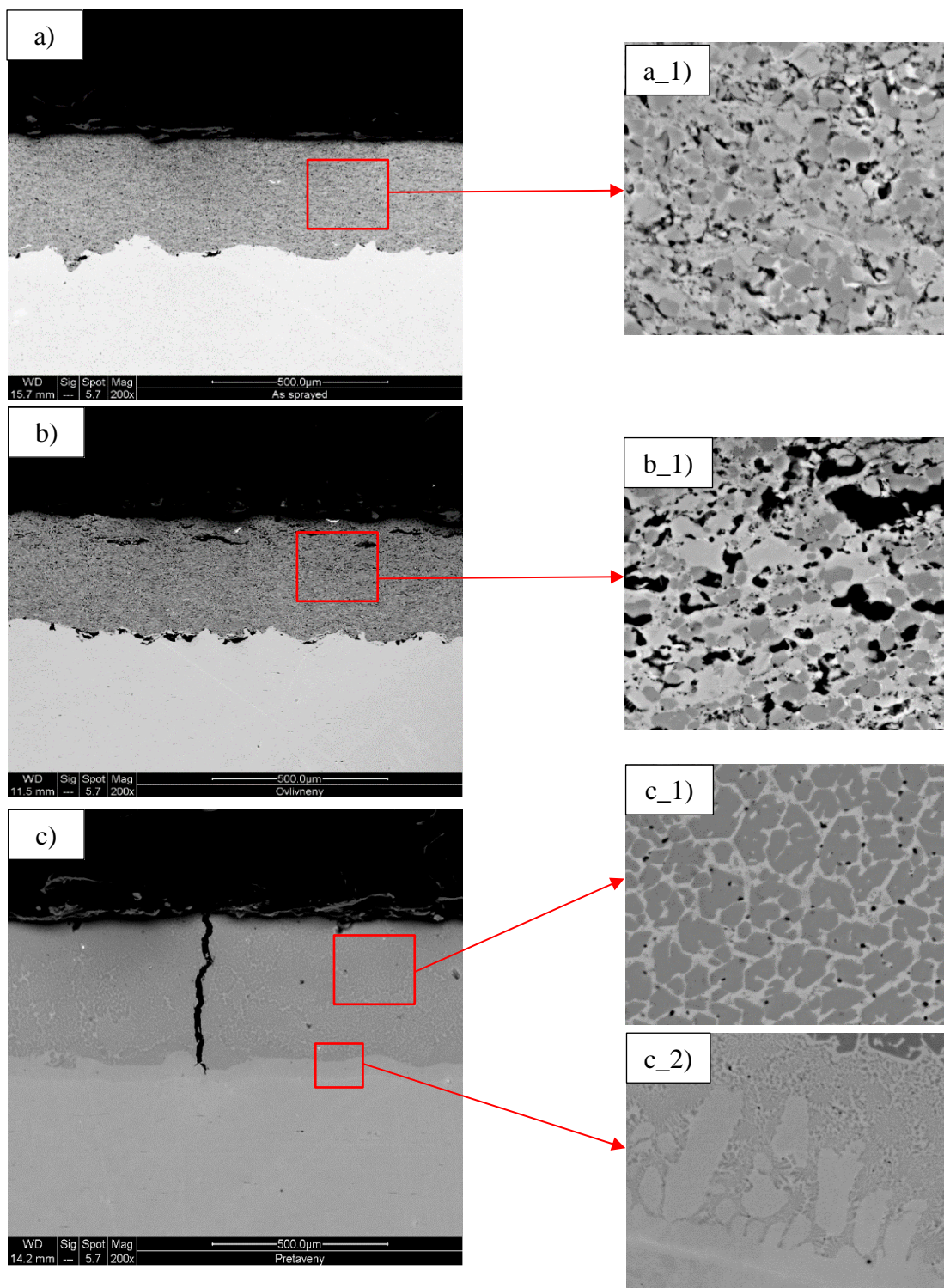
Mikrostruktura neovlivněného povlaku je tvořena karbidy na bázi CrC a matricí (viz. Obr. 60 a_1). Struktura obsahuje, ve srovnání s jinými HVOF stříkanými povlaky [12,56] velké množství pórů. Na snímcích z elektronového mikroskopu lze rozpoznat více fází, než odpovídá původnímu složení Cr_3C_2 a CoNiCrAlY . Také EDS analýza ukázala rozdílné chemické složení v závislosti na odstínech šedi. Mikrostruktura povlaku $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-CoNiCrAlY}$ je podrobně popsána ve studii [56] a [88]. XRD analýzy v těchto studiích ukázaly výskyt karbidů Cr_3C_2 , Cr_7C_3 , slitiny CoNiAl a oxidu Cr_2O_3 .

Povlak, který byl laserem tepelně ovlivněn, má mikrostrukturu obdobnou povlaku po nástřiku. I v tomto případě lze na SEM snímcích rozpoznat více fází. EDS analýza ukázala různý obsah chemických prvků v těchto fázích. Předběžná XRD analýza [89] ukazuje na obsah 38 % karbidu typu Cr_3C_2 a 52 % karbidu typu Cr_7C_3 , což znamená mírný nárůst oproti povlaku po nástřiku oproti studii [56]. Na snímku (Obr. 60 b_2) lze také pozorovat počátky opětovné precipitace karbidu z přesyceného roztoku matrice vlivem tepelného zpracování laserem. Precipitace karbidů z přesycené matrice při tepelném zpracování byla popsána v pracích [12,17,56,88]. Vliv precipitace na tribologické vlastnosti je zpravidla považován za pozitivní [12,17,56,88]. Tepelné laserové zpracování však způsobilo vznik podpovrchových trhlin, které se negativně projeví zejména při opotřebením abrazivními částicemi při zkoušce dle ASTM G-65.

Povlak, který byl laserově přetaven (obr. 60 c), má zcela jinou mikrostrukturu ve srovnání s povlakem po nástřiku. Přetavený povlak je zcela bez hranic splatů, obsahuje pouze mikropóry. V povlaku jsou přítomny příčné trhliny, jejichž vliv na odolnost proti opotřebením nebyl zaznamenán, avšak při aplikaci povlaku v korozním prostředí by pravděpodobně působily negativně [90].

Pomocí analýzy EDX bylo zjištěno prvkové složení v jednotlivých strukturních komponentách laserem přetaveného povlaku. Tmavá fáze, bohatá na uhlík, chrom a železo, může být typem směsného karbidu $(\text{FeCr})_x\text{C}_y$. Tato hypotéza je podpořena předběžnou XRD analýzou [89], viz příloha Obrázek 13 a 14. Smísení materiálu povlaku s materiálem podkladu se projevilo i ve světlé fázi, obsahující vysoké procento Fe. Dle předběžné XRD analýzy [89], viz příloha Obrázek 13 a 14, se jedná o slitinu na bázi Ni. XRD měření bylo realizováno na obroušeném

povrchu povlaku. Množství Fe v povlaku klesá směrem od substrátu k povrchu. Lze tedy předpokládat, že v podpovrchové vrstvě bylo množství Fe nižší než uprostřed povlaku, kde byl pořízen snímek z elektronového mikroskopu a analyzováno chemické složení pomocí EDS analýzy (Obr. 60 c_1, Tab. 13).



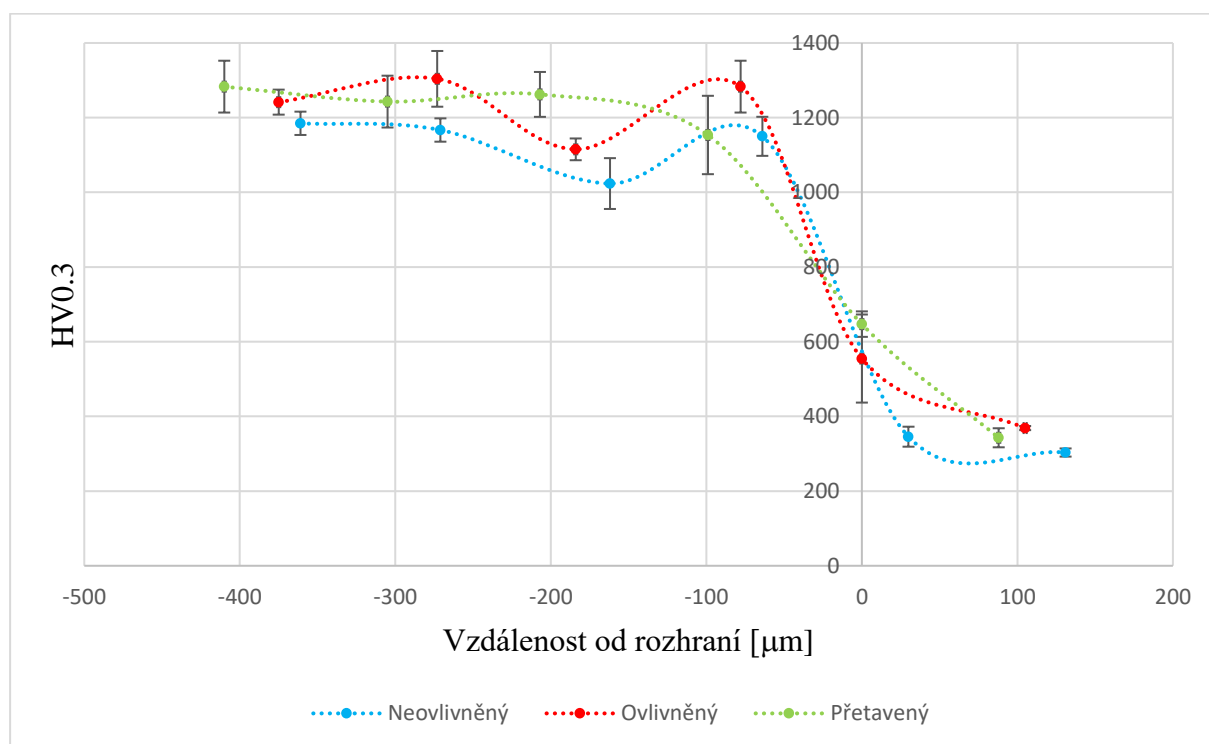
Obr. 60 - Snímky z SME neovlivněného a), ovlivněného b) a neovlivněného c) povlaku.

15.2. Porovnání hodnot výsledků měření mikrotvrdości

Na obr. 61 je znázorněno srovnání průběhů mikrotvrdości v závislosti na vzdálenosti od povrchu substrátu pro neovlivněný, ovlivněný a přetavený nástřík. Lze pozorovat kolísavý průběh mikrotvrdości pro neovlivněný a ovlivněný nástřík. Toto kolísání může být zapříčiněno nahromaděnými póry, oxidickými vměstkami nebo nenatavenými částicemi, což popisuje Rakhes [91] ve své studii. Oproti tomu přetavený nástřík, kde došlo k částečné homogenizaci povlaku a výraznému snížení pórů, jeví rovnoměrný průběh mikrotvrdości.

Z obr. je patrné, že laserová modifikace zvýšila tvrdost povlaku. Vliv tepelného zpracování na změny tvrdosti HVOF stříkaných povlaků není jednoznačný. Zatímco v některých studiích bylo prokázáno zvýšení mikrotvrdości [15,16,92], v jiných studiích bylo pozorováno snížení hodnoty mikrotvrdości [17,92]. Nejčastěji se zvýšení hodnot tvrdosti připisuje precipitaci malých sekundárních karbidů chromu [54]. Ve článku [12] způsobilo tepelné ovlivnění laserem nárůst tvrdosti precipitací sekundárních karbidů a vyšší soudržnosti karbidického síťoví.

Z grafu lze také vidět relativně velkou směrodatnou odchylku u některých měření. To může být zapříčiněno faktem, že povlak obsahuje jak matici, tak tvrdší karbidy chromu. Je důležité poznamenat, že indentor může někdy změřit mikrotvrdość karbidu chromu a někdy matrice, což může zásadně ovlivnit zde uvedené výsledky.



Obr. 61 - Srovnání průběhů mikrotvrdości v závislosti na vzdálenosti od povrchu pro neovlivněný, ovlivněný a přetavený nástřík.

15.1. Porovnání hodnot výsledků měření proti opotřebení dle ASTM G-133

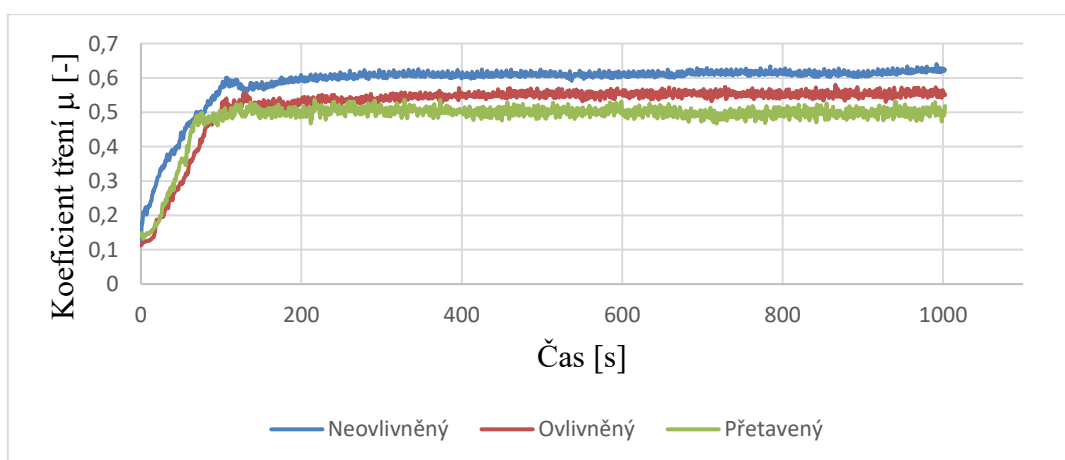
Vzájemné porovnání reprezentativních průběhů koeficientu tření v závislosti na čase je znázorněno na obr. 62. Z Obr. je patrné, že jak povlak přetavený, tak povlak ovlivněný vykazují nižší hodnoty ustáleného koeficientu tření v závislosti na čase oproti povlaku neovlivněnému. Obdobný trend byl popsán ve studii Houdková et al [56]. V porovnání se studií Matikainen et al [88] vyšla hodnota koeficientu tření i koeficientu opotřebení velmi podobně pro povlak neovlivněný $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-CoNiCrAlY}$ s porovnáním povlaku $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$, kterým se zabýval Matikainen ($0,65$ vs. $0,68$, respektive $(2,5 \pm 0,22) \cdot 10^{-6}$ vs. $(1,58 \pm 0,75) \cdot 10^{-6}$).

Odolnost proti opotřebení charakterizuje koeficient opotřebení, který zahrnuje objemový úbytek v závislosti na měřené vzdálenosti a zatížení, viz Obr. 63. Z grafu je patrné, že nejlepší výsledek vykazuje povlak ovlivněný a dále pak přetavený (zde je nutné brát v potaz větší směrodatnou odchylku), což také koreluje s hodnotou mikrotvrlosti pro dané povlaky.

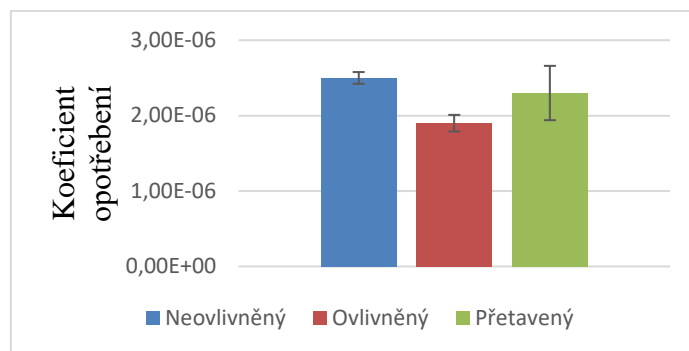
Morfologie neovlivněného povlaku po opotřebení, viz Obr. 49, ukazuje uvolňování jednotlivých karbidických částic, což také popisují studie [56,88]. Lze pozorovat i ojedinělé abrazivní opotřebení, způsobené zřejmě uvolněnou karbidickou částicí, zachycenou během pohybu mezi povrchem a ocelovou kuličkou (Obr. 49 c). Tento jev byl pravděpodobně důvodem i vyššího naměřeného koeficientu tření.

Morfologie ovlivněného povlaku po opotřebení, viz Obr. 51, ukazuje k uvolňování velkých částí povlaku (Obr. 51 a, b) vlivem přítomnosti podpovrchových trhlin (viz Obr. 43 a). Avšak karbidické částice, zabudované v matrici, vykazují vyšší míru odolnosti proti uvolňování při namáhání vzájemným oscilačním pohybem kuličky a povrchu (Obr. 51 c). Menší množství uvolněných karbidů mělo za následek nižší naměřenou hodnotu koeficientu tření, stejně jako nižší celkové opotřebení.

Morfologie ovlivněného povlaku po opotřebení je znázorněna na Obr. 53. Oproti ovlivněnému povlaku nedocházelo k uvolnění větších částic povlaku. Dominantním mechanismem je plastická deformace a adhezivní opotřebení. Ve stopě po opotřebení lze pozorovat vznik tribofilmu (Obr. 53 b, c). Tribofilm vzniká oxidací kovových fází z opotřebovaných částí povlaku a ocelové kuličky a je pravděpodobným důvodem nejnižšího koeficientu tření. V tribofilmu lze předpokládat obsah oxidů Fe, pocházející z chromové oceli protikusy, avšak tuto domněnku je nutné ověřit pomocí EDS analýzy.



Obr. 62 - Srovnání průběhů koeficientu tření v závislosti na čase pro neovlivněný, ovlivněný a přetavený nástřik.



Obr. 63 - Srovnání koeficientu opotřebení při testu dle ASTM G-133.

15.2. Porovnání hodnot výsledků měření proti opotřebení dle ASTM G-65

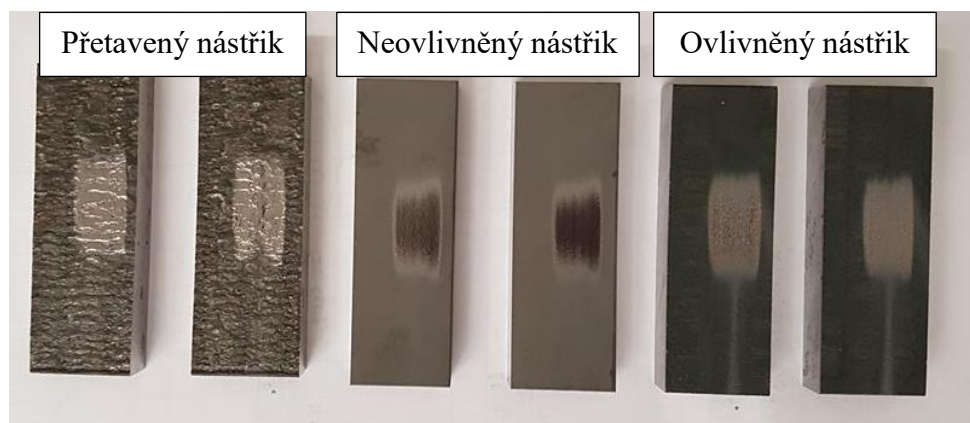
Na Obr. 64 jsou zobrazeny vzorky po 4. cyklu měření. Závislost objemového úbytku na abrazivní dráze pro jednotlivé povlaky je znázorněna na Obr. 65 a koeficient opotřebení na Obr. 66.

Z Obr. 65 je patrné, že objemový úbytek byl nejnižší u neovlivněného povlaku. Tepelné ovlivnění mělo tak negativní účinek na charakter abrazivního opotřebení. Ke stejnému závěru došel i Janka et al ve své studii [18]¹⁸.

Neovlivněný povlak nevykazoval žádné známky uvolnění větších částic z povlaku. Na snímcích (Obr. 55) jsou vidět příčné stopy, které jsou způsobeny vlivem abrazivních částic korundu.

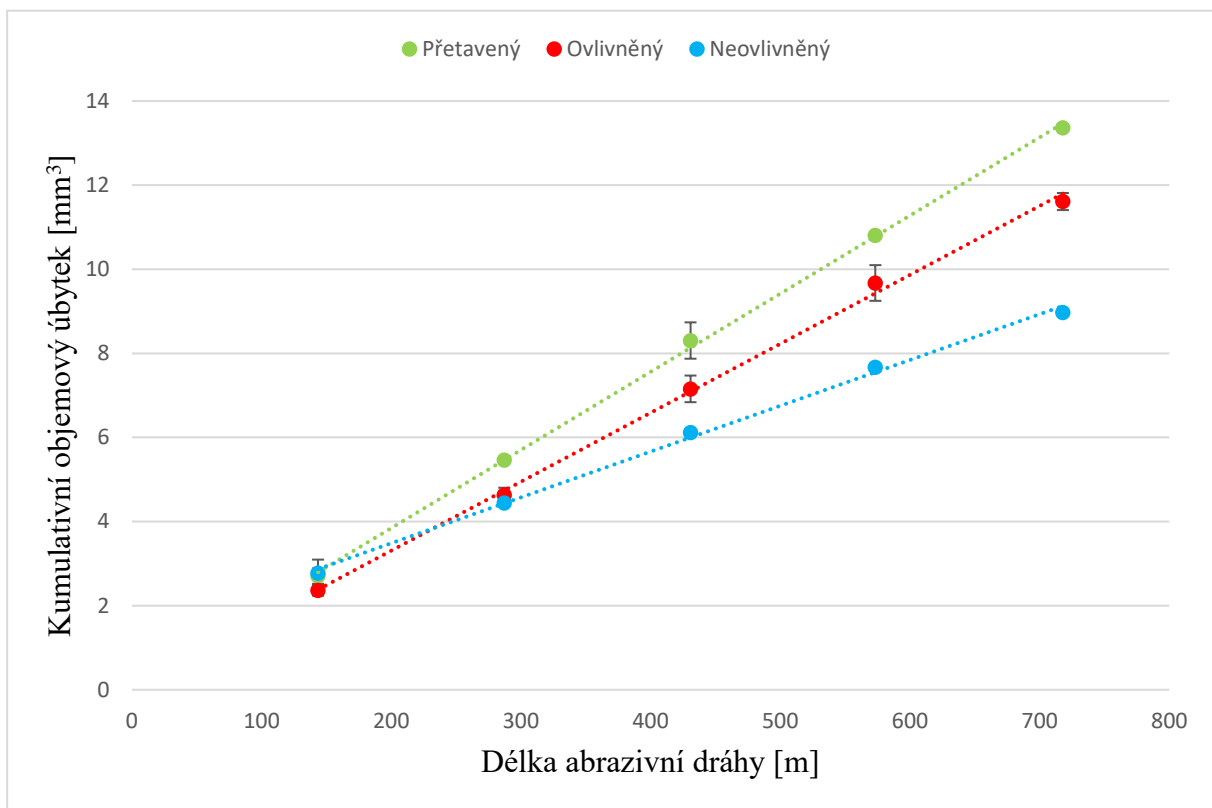
Oproti tomu u ovlivněného povlaku došlo k uvolnění větších částic povlaků. K těmto delaminacím dochází pravděpodobně v místech podpovrchových trhlin, viz Obr. 43.

Neovlivněný povlak neobsahuje žádné delaminace ani vytržené částice. Jsou patrné pouze výrazné stopy po abrazivní působení částic Al_2O_3 . Tyto stopy (Obr. 59) se jeví, v porovnání s neovlivněným a ovlivněným povlakem (Obr. 55 a 57) větší. To je pravděpodobně zapříčiněno výraznou změnou mikrostruktury povlaku oproti povlaku po nástřiku, přítomností Fe ve struktuře a vznikem směsného karbidu $(FeCr)_x C_y$, jehož vlastnosti se mohou lišit od vlastností karbidů CrC.

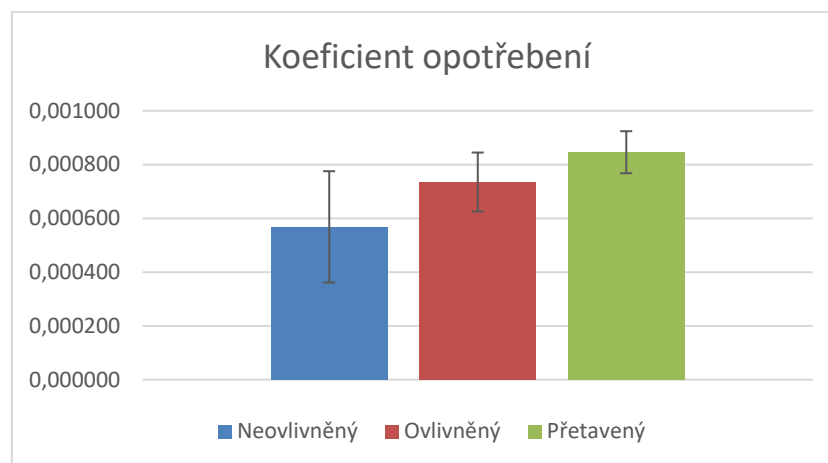


Obr. 64 - Vzorky jednotlivých nástřiků po 3. cyklu měření dle ASTM G-65.

¹⁸ V této studii je popisováno zhodnocení tepelného ovlivnění abrazivního opotřebení pro povlak Cr_3C_2-NiCr . Abrazivní test byl měřen při parametrech: Přítlačná síla – 130 N, Abrazivní dráha – 4200 m, Abrazivní částice: Ottawa silica sand.



Obr. 65 - Srovnání rychlosti abrazivního opotřebení



Obr. 66 - Srovnání koeficientu opotřebení při testu dle ASTM G-65.

16. Závěr

Tato diplomová práce se zabývá využitím technologie laserového tepelného zpracování k modifikaci HVOF nástřiku na bázi cermetu.

Práce je rozdělena na teoretickou a praktickou část. V teoretické části je popsán princip a jednotlivé typy laserů, použití laserových technologií a modifikace povrchu laserem. Dále jsou popsány žárové nástřiky, zejména technologie HVOF. Velký důraz je kladen na materiály vhodné k nanášení pomocí HVOF a na laserové zpracování žárově stříkaných povlaků. V neposlední řadě jsou popsány metody následného zpracování žárových nástřiků.

Pro experimentální část byla vytvořena matice parametrů pro vytvoření dostatečného spektra vzorků. Tato matice lze rozdělit na dvě hlavní série – série 1 (viz Tab. 8) s názvem přetavený a série 2 (viz Tab. 9) s názvem ovlivněný. Takto modifikované vzorky byly společně s neovlivněným povlakem $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-CoNiCrAlY}$ zkoumány pomocí optické mikroskopie.

Následně byly vybrány parametry pro další část experimentu. Modifikované vzorky byly společně s neovlivněným povlakem $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-CoNiCrAlY}$ zkoumány pomocí SEM. Dále byl změřen průběh mikrotvrdosti, abrazivní opotřebení dle ASTM-G65 a kluzné opotřebení dle ASTM G-133.

Práce potvrdila vliv laserového tepelného zpracování na změny mikrostruktury v závislosti na použitých parametrech laserového zpracování. Byl prokázán pozitivní vliv laserového zpracování na zvýšení tvrdosti, snížení koeficientu tření a odolnosti povlaku proti kluznému opotřebení dle ASTM G-133.

V případě odolnosti proti abrazivnímu opotřebení byl pozorován negativní vliv laserového zpracování z důvodů vzniku podpovrchových trhlin a degradace materiálu povlaku příměsí Fe z nataveného substrátu.

Přínosem práce je zejména prokázán potenciál využití laserového tepelného zpracování ke zlepšení charakteristik kluzného tření a opotřebení HVOF nástřiku $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-25%CoNiCrAlY}$.

Seznam použité literatury

- [1] ZAHÁLKA, F. Disertační práce. Studium vlastností vybraných HP/HVOF nástřiků. Plzeň ZČU, 2012, 198str.
- [2] SULZER, M. [online] High Velocity Oxy-Fuel (HVOF) Solutions. Handbook Catalogue 2013, [cit. 2017-10-7] Dostupné z: <https://www.upc.edu/sct/es/documents_equipament/d_323_id-804-1.pdf>
- [3] LIMA, R. S., KHOR, A. B., LI, H., CHEANG, P., MARPLE, B. R. HVOF spraying of nanostructured hydroxyapatite for biomedical applications. 2005, Materials Science and Engineering: A Volume 396
- [4] LIMA, R. S., KHOR, A. B., LI, H., CHEANG, P., MARPLE, B. R. Mechanical properties, microstructural characteristics and in-vitro behavior of APS-sprayed nanostructured and conventional hydroxyapatite coatings. International Thermal Spray Conference (ITSC) 2004, 10-12 May 2004, Osaka, Japan. ISBN 978-0-871-70809-0
- [5] MARCHEVKA, P. Diplomová práce. Aplikace technologie laserového přetavení HVOF stříkaných povlaků ke zvýšení kvality povlaků na bázi Co. Plzeň ZČU, 2014, 76 str.
- [6] ČERNÝ, J. Diplomová práce. Degradace vybraných HVOF nástřiků vlivem působení vysoké teploty a v prostředí horké tlakové páry. Praha ČVUT, 2015, 88 str.
- [7] ČESÁNEK, Z. Disertační práce. Žárově stříkané povlaky používané v korozně působícím prostředí. Plzeň ZČU, 2015, 292 str.
- [8] PAWLOWSKI, L. The Science and Engineering of Thermal Spray Coatings, 2nd Edition. 2008, 656 str. John Wiley & Sons, Ltd. ISBN: 978-0-471-49049-4
- [9] MATEOS, J., CUETOS, J. M., VIJANDE, R., FERNÁNDEZ, E. Tribological properties of plasma sprayed and laser remelted 75/25 Cr₃C₂/NiCr coatings. Tribology International Volume 34, 2001
- [10] MORIMOTO, J., SASAKI, Y., FUKUHARA, S., ABE, N., TUKAMOTO, M. Surface modification of Cr₃C₂-NiCr cermet coatings by direct diode laser. Vacuum 80 (2006) 1400–1405
- [11] MANN, B. S. High Power Diode Laser-Treated HP-HVOF and Twin Wire Arc-Sprayed Coatings for Fossil Fuel Power Plants, Journal of Materials Engineering and Performance Volume 22(8), 2013-2200
- [12] JANKA, L., NORPOTH, S., EICHER, S., VUORISTO, P., RIPOLL, M. Improving the toughness of thermally sprayed Cr₃C₂-NiCr hardmetal coatings by laser post-treatment, Materials and Design 98, 2016
- [13] YIN, Z. J., TAN, X. H., WANG, Q. X., XU, S. H., HAO, R. L., DENG, Q. L. Improved microstructure and properties of thermal-sprayed cermet coatings modified by laser remelting post-treatment. Shanghai/CN, and J. S. Sun, Tianjin/CN

- [14] JANKA, L. et al. Improving the toughness of thermally sprayed Cr₃C₂-NiCr hardmetal coatings by laser post-treatment. Department of Materials Science, Tampere University of Technology, Korkeakoulunkatu 6, FI-33101 Tampere, Finland, 2016.
- [15] GUILMANY, J. M., LORENZANA, C., DELGADO, J., SANCHEZ, J., MARTI, C. Role of Heat Treatments in the Improvement of the Sliding Wear Properties of Cr₃C₂-NiCr Coatings, Surf. Coat. Technol., 2002, 157, p 207-213
- [16] MATTHEWS, S., HYLAND, M., JAMES, B. Microhardness Variation in Relation to Carbide Development in Heat Treated Cr₃C₂-NiCr Thermal Spray Coatings, Acta Mater., 2003, 51(14), p 4267-4277
- [17] JANKA, L., NORPOTH, J., TRACHE, R., BERGER, L. M. Influence of Heat Treatment on the Abrasive Wear Resistance of a Cr₃C₂-NiCr Coating Deposited by an Ethene-Fuelled HVOF Spray Process, Surf. Coat. Technol., 2016, 291, p 444-451
- [18] ENGST, P., HORÁK, M. Aplikace laserů. Populární přednášky o fyzice – svazek 34. Praha 1989. DT 621.375.826.
- [19] ŠULC, J., Lasery a jejich aplikace. 2002
- [20] ORAZIO, S., Principles of Lasers. Polytechnic Institute of Milan and National Research Council, Milan, Italy. Páté vydání, 2010. ISBN 978-1-4419-1301-2
- [21] VRBOVÁ, M., Lasery a moderní optika. Praha, Prometheus, 1994. 474 s. ISBN 80-85849-56-9.
- [22] Lukáš, M. [online] Laserové diody – Princip funkce laserových diod. 2001/34, 2001, [cit. 2016-11-10] Dostupné z: <<http://www.elektrorevue.cz/clanky/01034/index.html>>
- [23] MRŇA, L. [online] Využití výkonových laserů ve strojírenské praxi svařování, dělení a další technologie. Ústav přístrojové techniky AV ČR. Odbor svařování a povrchových úprav. Dostupné z: <https://is.muni.cz/el/1431/jaro2012/F5900/um/prezen/mrna_dendero.pdf>
- [24] MERENDA, P. Diplomová práce. Aplikace laserových technologií v průmyslu se zaměřením na obrábění a úpravu povrchu. Brno VUT, 2010, 75 str.
- [25] LAPŠANSKÁ, H. Laserové technologie v praxi. Společná laboratoř optiky – Moderní technologie ve studiu aplikované fyziky. Univerzita Palackého v Olomouci, 2010.
- [26] TODT, W. Diode Lasers for Materials Processing. Laserline, Inc.
- [27] ION, J. C. Laser processing of engineering materials. Principles procedure and industrial application. Elsevier Butterworth-Heinemann, 2005. ISBN: 0-7506-6079-1
- [29] KANNATEY-ASIBU, E., PRINCIPLES OF LASER MATERIALS PROCESSING. Published by John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, 2009. 820 s. ISBN 978-0-470-17798-3
- [30] SVOBODOVÁ, M. Diplomová práce. Vliv povrchového kalení u nízkoaloyovaných ocelí. Brno, Mendelova zemědělská a lesnická univerzita v Brně, agronomická fakulta. 2008, 79 str.

- [31] SCHMID, R. K. An Industrial Perspective on Thermal Spray. 7th Rencontres Internationales sur la Projection Thermique, Limoges, 2015
- [32] DAVIS, J. R. ASM Handbook, Volume 5A: Thermal Spray Technology. Prepared under the direction of the ASM Thermal Spray Society Training Committee. 2004, ISBN: 978-1-61503-996-8
- [33] VARDELLE, A. M., MOREAU, CH., VUORISTO, P., AKEDO, J. The 2016 Thermal Spray Roadmap. Journal of Thermal Spray Technology. 25. 10.1007/s11666-016-0473-x.
- [34] HOUDKOVÁ, Š., ZAHÁLKA, F., KAŠPAROVÁ, M., BLÁHOVÁ, O. Nanoindentační měření HVOF stříkaných povlaků. Chem. Listy 105, 2011
- [35] ZIMMERMANN S., KREYE H. Proc. of the 9th National Thermal Spray Conf., Cincinnati, ASM International, Materials Park, Ohio, USA (1996), p. 147.
- [36] CARTIER, M. Handbook of surface treatments and coatings. ASME Press, New York, 2003, 464 str. ISBN: 978-1-86058-375-9
- [37] DAVIS J. R. Handbook of thermal spray technology. ASM International, Materials Park, OH, 2004, 338 str. ISBN: 978-0-87170-795-6
- [38] WANK, A. Basics of Thermal Spray Technology. GTV Verschleiss-Schutz GmbH, Luckenbach
- [39] OKSA, M., TURUNEN, E., SUHONEN, T., VARIS, T., HANNULA, S. P. Optimization and Characterization of High Velocity Oxy-fuel Sprayed Coatings: Techniques, Materials, and Applications. Coatings, Vol. 1, pp. 17-52. 2011, ISSN 2079-6412.
- [40] FIEDLER, L. Diplomová práce. Vliv parametrů laserového navařování na korozní vlastnosti návaru. Plzeň ZČU, 2014, 87 str.
- [41] KOLOŠ, D. Diplomová práce. Závislost vybraných parametrů hodnocení obrobených ploch tvrdých povlaků na konstrukci řezného nástroje. Plzeň ZČU, 2017, 89 str.
- [42] STURGEON, A. J. The corrosion behaviour of HVOF sprayed stainless steel and nickel alloy coatings in artificial seawater. Paper No. 03245 presented at CORROSION 2003, NACE Conference, 16-21 March 2003, San Diego, CA, USA
- [43] STURGEON A. J. Microstructure characteristics and corrosion behaviour of HVOF sprayed metallic coatings. Paper AS153 presented at ITSC 2001 International Thermal Spray Conference, 28-30 May 2001, Singapore
- [44] HARVEY, M. D. F., LUNDER, O., HENRIKSEN, R. Development of corrosion resistant coatings by HVOF spraying. Paper presented at International Thermal Spraying Conference, Montreal, Canada, 8-11 May 2000
- [45] BULLARD, S. J., CRAMER, S. D., COVINO, B. S., HOLCOMB, G. R., ZIOMEK-MOROZ, M. Corrosion behavior of an HVOF-sprayed Fe₃-Al coating in a high-temperature oxidizing/sulfidizing environment. Paper presented at EPRI/DOE Fourth international conference on advances in materials technology for fossil fuel power plants. Hilton Head Island, S Carolina. 26-28 October 2004.

- [46] REIGNIER, C., STURGEON, A., HVOF sprayed WC-Co-Cr as a generic coating type for replacement of hard chrome plating. Paper 99 presented at ITSC 2002 International Thermal Spray Conference, 4-6 March 2002, Essen, Germany
- [47] ČESÁNEK, Z., HOUDKOVÁ, Š., SCHUBERT, J., JANOUŠEK, V., KAŠPAROVÁ, M. Korozní odolnost vybraných žárových nástřiků vytvořených technologií HVOF. In Vrstvy a povlaky 2013. Trenčín: Miloš Vavrlík - Kníhviazačstvo, 2013. s. 7-12. ISBN: 978-80-970824-2-0
- [48] PRANTNEROVÁ, M. Disertační práce. Hodnocení vztahu mikrostruktury a vlastností žárových nástřiků. Plzeň ZČU, 2014, 122 str.
- [49] LÍBAL, M. Diplomová práce. Stanovení hlavních parametrů ovlivňujících přilnavost a odolnost povlaků žárových nástřiků vytvořených elektrickým obloukem. Plzeň ZČU, 2013, 78 str.
- [50] HOUDKOVÁ, Š., BLÁHOVÁ, O., KAŠPAROVÁ, M. The mechanical properties of HVOF sprayed Cr_3C_2 -25%CoNiCrAlY coating, determined by indentation. Chemické listy, 2012, roč. 106, č. S, s. 428-431. ISSN: 0009-2770
- [51] HOUDKOVÁ, Š., KAŠPAROVÁ, M., SCHUBERT, J. The spraying parameters optimization of the HVOF Stellite 6 coating. 23. ročník mezinárodní konference metalurgie a materiálů METAL 2014, 21. - 23. května 2014
- [52] PAUL, S., HARVEY, M. D. F. Corrosion Testing of Ni Alloy HVOF Coatings in High Temperature Environments for Biomass Applications. TWI, Cambridge, 2012
- [53] VOSTŘÁK, M., TESAŘ, J., HOUDKOVÁ, Š., HRUŠKA, M. Diagnostic of laser remelting of HVOF sprayed Stellite coatings using an infrared camera. Surface and Coatings Technology, 2017
- [54] PICAS, J. A., PUNSET, M., MENARGUES, S., MARTÍN, E., BAILE, M. T. Microstructural and tribological studies of as-sprayed and heat-treated HVOF Cr_3C_2 -CoNiCrAlY coatings with a CoNiCrAlY bond coat. Light Alloys and Surface Treatments Design Centre, Department of Materials Science and Metallurgy, Universitat Politècnica de Catalunya, 2014
- [55] UTU, D., MARGINEAN, G., SERBAN, V. A., CODREAN, C. Corrosion Behavior of Laser Remelted CoNiCrAlY Based Composite Coatings, Engineering, 2010, 2, 322-327, 2010
- [56] HOUDKOVÁ, Š., ČESÁNEK, Z., SMAZALOVÁ, E., LUKÁČ, F. The High-Temperature Wear and Oxidation Behavior of CrC-Based HVOF Coatings. Journal of Thermal Spray Technology, 2017
- [57] Oerlicon Metco. [online] Thermal Spray Materials Guide. 2017, [cit. 2017-11-04]. Dostupné z: <<https://www.oerlikon.com/metco/en/products-services/coating-materials/coating-materials-thermal-spray/metals-alloys-composites-blends/>>
- [58] SAVKOVÁ, J., HOUDKOVÁ, Š., KAŠPAROVÁ, M. High temperature tribological properties of the HVOF sprayed TiC-based coatings. METAL 2012 - Conference Proceedings, 21st International Conference on Metallurgy and Materials, 2012

- [59] HOUDKOVÁ, Š., KAŠPAROVÁ, M. Experimental Study of Indentation Fracture Toughness in HVOF Sprayed Hardmetal Coatings. *Engineering Fracture Mechanics*, 2013, roč. 110, č. září, s. 468-476. ISSN: 0013-7944
- [60] MM Průmyslové spektrum. [online] Technologie žárového nástřiku v leteckém průmyslu. 010539 Vyšlo v MM: 2001 / 5, 09. 05. 2001 v rubrice Trendy / Povrchové úpravy, str. 19. [cit. 2017-11-10]. Dostupné z: <<https://www.mmspektrum.com/clanek/technologie-zaroveho-nastriku-v-leteckem-prumyslu.html/>>
- [61] VZÚ Plzeň. [online] Technologie žárových nástřiků. [cit. 2017-11-10]. Dostupné z: <<https://www.vzuplzen.cz/zarove-nastriky/technologie.php/>>
- [62] Metal Spray Suppliers (NZ) Ltd. [online] Metal powders for Flame Spray, HVOF and Plasma. 2016, [cit. 2017-11-04]. Dostupné z: <<http://www.metal-spray.co.nz/product-range/thermal-spray-powder/>>
- [63] DAVIS, J. R. ASM Specialty Handbook – Nickel, Cobalt, and Their Alloys. Prepared under the direction of the ASM International Handbook Committee. ASM International Materials Park, OH 44073. ISBN: 0-87170-685-7
- [64] CHATHA, S. S. Disertační práce. Post treatment of thermal spray coatings for improving their corrosion resistance at high temperature. Punjabi University 2012, 409 str.
- [65] KHOR, K. A., YU, L. G., CHAN, S. H. AND CHEN, X. J. Densification of plasma sprayed YSZ electrolytes by spark plasma sintering (SPS), *J. Eur. Ceram. Soc.*, 2003, 23, 1855–1863.
- [66] AGRAWAL, D. K. Microwave processing of ceramics, *Curr. Opin. Solid State Mater. Sci.*, 3, 480–485, 1998
- [67] ZIMMERMAN, F. X., TOOPS, J. [online] Hot Isostatic Pressing: Today and Tomorrow. Avure Technologies, Inc., 2008, [cit. 2017-10-9] dostupné z: <<http://kittyhawkinc.com/wp-content/uploads/sites/392/2015/06/HIP-Today-and-Tomorrow.pdf>>
- [68] SIMUNOVIC, K., SLOKAR, L., HAVRLIŠAN, S. SEM/EDS investigation of one-step flame sprayed and fused Ni-based self-fluxing alloy coatings on steel substrates. *Philosophical Magazine* 97(4):1-21, 2016, DOI: 10.1080/14786435.2016.1257167
- [69] LEIVO, E. M., VIPPOLA, M. S., SORSA, P. P. A., VUORISTO, P. M. J., MÄNTYLÄ, T. A. Wear and corrosion properties of plasma sprayed Al₂O₃ and Cr₂O₃ coatings sealed by aluminum phosphates, *J. Therm. Spray Technol.*, 1997, 6, 205–210
- [70] RIETWELD, H., M. A profile refinement method for nuclear and magnetic structures. *Journal of Applied Crystallography*, 1969, vol.2, no. 2, pp.65–71.
- [71] CHEARY, R., W. A fundamental parameters approach to X-ray line-profile fitting. *Journal of Applied Crystallography*, 1992, vol.25, no. 2, pp.109–21.
- [72] PT. INTEC Instruments. [online] Integrated Technologies. [cit. 2018-05-01] Dostupné z: <http://www.intecinstruments.com/display/dsp_struers_5.htm>

- [73] ADVANCED COATING. [online] Metallographic preparation – Examens microscopiques and coating characterization. [cit. 2018-05-01] Dostupné z: <<http://www.advanced-coating.com/english/lab-metallographic-preparation.htm>>
- [74] SPECTRO GRAPHIC. [online] Suppliers of new and used equipment for material testing - Struers Labopol-5 Metallurgical Grinder Polisher. [cit. 2018-05-01] Dostupné z: <<https://spectrographic.co.uk/shop/recent-sales-refurbished/struers-labopol-5-metallurgical-grinder-polisher>>
- [75] Thermo Fisher Scientific Completes Acquisition of Phenom-World. [online] Scanning Electron Microscope - Quanta SEM. [cit. 2018-05-01] Dostupné z: <<https://www.fei.com/products/sem/quanta-sem>>
- [76] ČSN EN ISO 6507-1. Kovové materiály - Zkouška tvrdosti podle Vickerse - Část 1: Zkušební metoda. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2006.
- [77] ČSN EN ISO 4516. Kovové a jiné anorganické povlaky - Zkoušky mikrotvrdosti podle Vickerse a podle Knoopu. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2003.
- [78] ALHASHMY, H., A. Fabrication of Aluminium Matrix Composites (AMCs) by Squeeze Casting Technique Using Carbon Fiber as Reinforcement. Ottawa-Carleton Institute for Mechanical and Aerospace Engineering, University of Ottawa, 2012
- [79] SÝKORA, Š. Bakalářská práce. Vliv struktury na mikrotvrdost polymerů. České vysoké učení technické v Praze, 2014, 50 str.
- [80] HOUDKOVÁ, Š., ČESÁNEK, Z., SMAZALOVÁ E., LUKÁČ, F. The High-Temperature Wear and Oxidation Behavior of CrC-Based HVOF Coatings. J Therm Spray Tech (2018) 27:179–195. Submitted: 6 June 2017 / Published online: 13 September 2017
- [81] ASTM INTERNATIONAL. ASTM G133 - 05(2016) - Standard Test Method for Linearly Reciprocating Ball-on-Flat Sliding Wear
- [82] HOUDKOVÁ, Š., SMAZALOVÁ, E., PALA, Z. Effect of Heat Treatment on the Microstructure and Properties of HVOF-Sprayed Co-Cr-W Coating. JTTEE5 25:546–557 DOI: 10.1007/s11666-015-0365-5. Submitted August 28, 2015; in revised form November 24, 2015
- [83] Tech Briefs – Engineering solutions for Design & Manufacturing. [online] Universal mechanical testers provide tribology testing for friction, wear, coatings, and lubrication in macro, micro, and nano regimes. [cit. 2018-03-12] Dostupné z: <<https://www.techbriefs.com/component/content/article/tb/techbriefs/mechanics-and-machinery/20501>>
- [84] MÜLLER, M., CHOTĚBORSKÝ, R., HRABĚ, P. [online] Aplikace návarového materiálu na nástroje zpracovávající půdu za účelem zvýšení jejich odolnosti vůči abrazivnímu opotřebení. LCaŘ 131, č. 9–10, 09-10/2015. [cit. 2018-02-17] Dostupné z: <http://www.cukr-listy.cz/on_line/2015/PDF/279-283.pdf>

- [85] ASTM Standard G65 - 04, Standard Method for Measuring Abrasion Using the Dry Sand/Rubber Wheel Apparatus, West Conshohocken: ASTM International, 2010.
- [86] HOUDKOVÁ, Š. Mechanické vlastnosti optimalizovaného nástřiku povlaku $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-CoNiCrAlY}$, Výzkumná zpráva VYZ-VZ-33/15/045, Výzkumný a zkušební ústav v Plzni, 2015
- [87] SAMIECOVÁ, E. Diplomová práce. Využití dynamometrů Kistler při hodnocení tvrdosti laserem kalené povrchové vrstvy. Plzeň ZČU, 2012, 62 str.
- [88] MATIKAINEN, V., KOIVULUOTOM, H., BOLELLI, G., SASSATELLI, P., LUSVARGHI, L., VUORISTO, P. Sliding wear behaviour of HVOF and HVAF sprayed Cr_3C_2 -based coatings. DOI10.1016/j.wear.2017.04.001, 2017
- [89] HOUDKOVÁ, Š., VOSTŘÁK, M., LUKÁČ, F., JÍCHA, J. Laser surface treatment of $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-CoNiCrAlY}$ HVOF sprayed coating.
- [90] HUNG-HUA, S., JIAN-HUANG, S., YIH-MING, L., KUNG-HSU, H., MING-DER, G. A Comparison of the Corrosion Resistance and Wear Resistance Behavior of Cr-C, Ni-P and Ni-B Coatings Electroplated on 4140 Alloy Steel, Int. J. Electrochem. Sci., 13 (2018) 3267 – 3278, doi: 10.20964/2018.04.49
- [91] RAKHES, M. M. Laser Surface Modification of HVOF Coatings for Improvement of Corrosion and Wear Performance. Manchester, UK: The University of Manchester; 2013.
- [92] MATTHEWS, S. J. JAMES, B. J., HYLAND, M. M. Microstructural Influence on Erosion Behaviour of Thermal Spray Coatings, Mater. Charact., 2007, 58(1), p 59-64

Seznam obrázků

Obr. 1 - Schematické znázornění tří procesů: a) - spontánní emise, b) - stimulovaná emise, c) - absorpce [20].	12
Obr. 2 - Princip laseru [19].	13
Obr. 3 - Závislost emitovaného optického výkonu na budícím proudu [22].	16
Obr. 4 - Porovnání šířky pásma emitovaného záření při spontánní stimulované emisi [22].	16
Obr. 5 – Zastoupení laserových technologií v průmyslu [23,24].	17
Obr. 6 – Zastoupení průmyslových aplikací při využití laserových technologií [23,24].	17
Obr. 7 - Struktura materiálu při laserovém přetavení [29].	19
Obr. 8 - Překryv jednotlivých stop laserového paprsku.	20
Obr. 9 - Princip LPVD [29].	21
Obr. 10 - Závislost tvrdosti podle Knoop a tloušťky deponované vrstvy na vzdálenosti mezi cílovým terčem a substrátem [29].	21
Obr. 11 - Schéma vytvrzení povrchové vrstvy materiálu rázovou vlnou [29].	22
Obr. 12 - Znázornění tloušťky a struktury při různých technologiích nanášení povlaků a tenkých vrstev. [31].	23
Obr. 13 - Snímek ze skenovacího elektronového mikroskopu. Plazmový žárový nástřík povlaku na bázi wolframu a jeho lamelární struktura [32].	24
Obr. 14 - Schéma žárového nástříku [2].	25
Obr. 15 - Zjednodušená struktura žárového nástříku [2].	26
Obr. 16 - HVOF stříkací pistole s plynným palivem [2].	28
Obr. 17 - HVOF stříkací pistole s kapalným palivem [2].	28
Obr. 18 - Trend HVOF procesu napříč jednotlivými generacemi v závislosti na teplotě plamene a rychlosti letících částic [39].	29
Obr. 19 - SEM snímek morfologie prášku Cr_3C_2 -25%CoNiCrAlY [35].	31
Obr. 20 - Kotoučová rozbrušovací pila Struers Labotom-3 [72].	40
Obr. 21 - Bruska a leštička Struers LaboPol-5 [74].	40
Obr. 22 - Zalisovací zařízení Struers Prontopress-20 [73].	40
Obr. 23 - Termoemisní SEM Quanta 200 od firmy FEI s EDX detektorem (mikrosonda) od firmy EDAX [75].	40
Obr. 24 - Schéma měření tvrdosti podle Vickerse [78,79].	41
Obr. 25 - Měření mikrotvrdosti dle Vickerse.	41
Obr. 26 – Schéma měření opotřebení metodou Ball-on-Flat dle ASTM G-133 [82].	42
Obr. 27 – Tribometr Bruker CETR-UMT 3.	42
Obr. 28 – Schéma měření drážek při měření opotřebení dle ASTM G-133.	43
Obr. 29 - Průběh profilu příčného řezu stopy po zkoušce dle ASTM G-133.	43
Obr. 30 – Schéma zařízení pro měření abrazivní odolnosti dle ASTM G-65 [84].	44
Obr. 31 – Zkušební zařízení pro měření abrazivní odolnosti dle ASTM G-65 [7].	44
Obr. 32 - Nástříkový systém TAFA JP 5000.	45
Obr. 33 - Laserový systém ISL-400L HPDD [87].	46
Obr. 34 - Robotická hlava FANUC M-710IC/50 [87].	46
Obr. 35 - Proces laserového zpracování.	47
Obr. 36 - Ocelový plech s jednotlivými stopami po přetavení série 1.	47
Obr. 37 - Ocelový plech s jednotlivými stopami po přetavení série 2.	48
Obr. 38 - Snímek povrchu parametru č. 1 série 2. Použité zařízení - Hirox KH-7700.	48
Obr. 39 - Plán experimentální části s vybranými parametry ovlivnění.	49
Obr. 40 – Snímky mikrostruktury série 1.	50
Obr. 41 – Snímky mikrostruktury série 2.	51

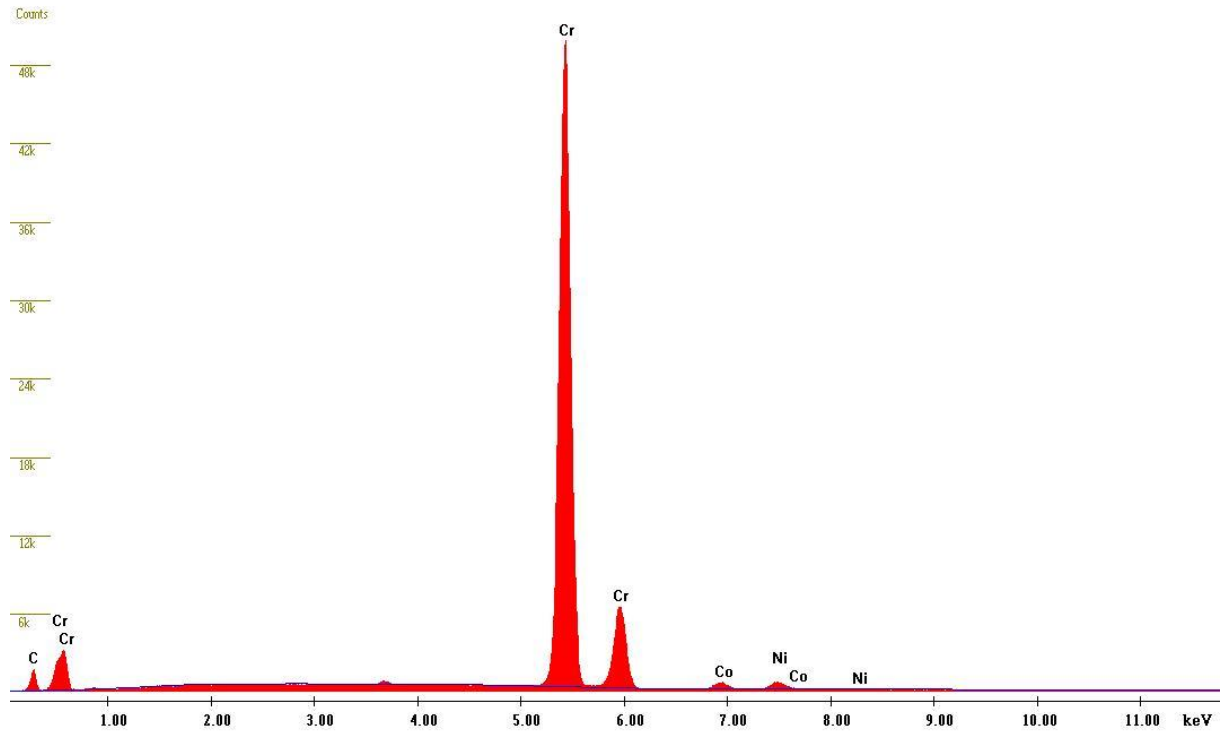
Obr. 42 - Snímky z SME neovlivněného nástřiku. Zvětšení: a) - 200x, b) - 1000x, c) - 3000x	52
Obr. 43 - Snímky z SME ovlivněného nástřiku. Zvětšení: a) - 200x, b) - 1000x, c) - 3000x, d) - 6000x.....	53
Obr. 44 - Snímky z SME přetaveného nástřiku. Zvětšení: a) - 200x, b) - 1000x, c) - 1000x d) - 3000x, e) - 3000x	55
Obr. 45 - Průběh mikrotvrdosti pro neovlivněný nástřik v závislosti na vzdálenosti od povrchu.	56
Obr. 46 - Průběh mikrotvrdosti pro ovlivněný nástřik v závislosti na vzdálenosti od povrchu.	57
Obr. 47 - Průběh mikrotvrdosti pro přetavený nástřik v závislosti na vzdálenosti od povrchu.	58
Obr. 48 - Průběh koeficientu tření v závislosti na čase pro HVOF nástřik.	59
Obr. 49 - Morfologie opotřebení neovlivněného nástřiku po testu dle ASTM G-133. Zvětšení: a) - 200x, b) - 1000x, c) - 3000x	60
Obr. 50 - Průběh koeficientu tření v závislosti na čase pro ovlivněný nástřik.	61
Obr. 51 - Morfologie opotřebení ovlivněného nástřiku po testu dle ASTM G-133. Zvětšení: a) - 200x, b) - 1000x, c) - 3000x	62
Obr. 52 - Průběh koeficientu tření v závislosti na čase pro přetavený nástřik.	63
Obr. 53 - Morfologie opotřebení přetaveného nástřiku po testu dle ASTM G-133. Zvětšení: a) - 200x, b) - 1000x, c) - 3000x	64
Obr. 54 - Závislost kumulativního objemového úbytku na délce abrazivní dráhy pro neovlivněný vzorek.	65
Obr. 55 - Morfologie opotřebení neovlivněného nástřiku po testu dle ASTM G-65. Zvětšení: a) - 200x, b) - 1000x, c) - 3000x	66
Obr. 56 - Závislost kumulativního objemového úbytku na délce abrazivní dráhy pro ovlivněný vzorek.	67
Obr. 57 - Morfologie opotřebení ovlivněného nástřiku po testu dle ASTM G-65. Zvětšení: a) - 200x, b) - 1000x, c) - 3000x.....	68
Obr. 58 - Závislost kumulativního objemového úbytku na délce abrazivní dráhy pro přetavený vzorek.	69
Obr. 59 - Morfologie opotřebení přetaveného nástřiku po testu dle ASTM G-65. Zvětšení: a) - 200x, b) - 1000x, c) - 3000x.....	70
Obr. 60 - Snímky z SME neovlivněného a), ovlivněného b) a neovlivněného c) povlaku. ...	72
Obr. 61 - Srovnání průběhů mikrotvrdostí v závislosti na vzdálenosti od povrchu pro neovlivněný, ovlivněný a přetavený nástřik.	73
Obr. 62 - Srovnání průběhů koeficientu tření v závislosti na čase pro neovlivněný, ovlivněný a přetavený nástřik.	74
Obr. 63 - Srovnání koeficientu opotřebení při testu dle ASTM G-133.....	75
Obr. 64 - Vzorky jednotlivých nástřiku po 3. cyklu měření dle ASTM G-65.	75
Obr. 65 - Srovnání rychlosti abrazivního opotřebení	76
Obr. 66 - Srovnání koeficientu opotřebení při testu dle ASTM G-65.....	76

Seznam Tabulek

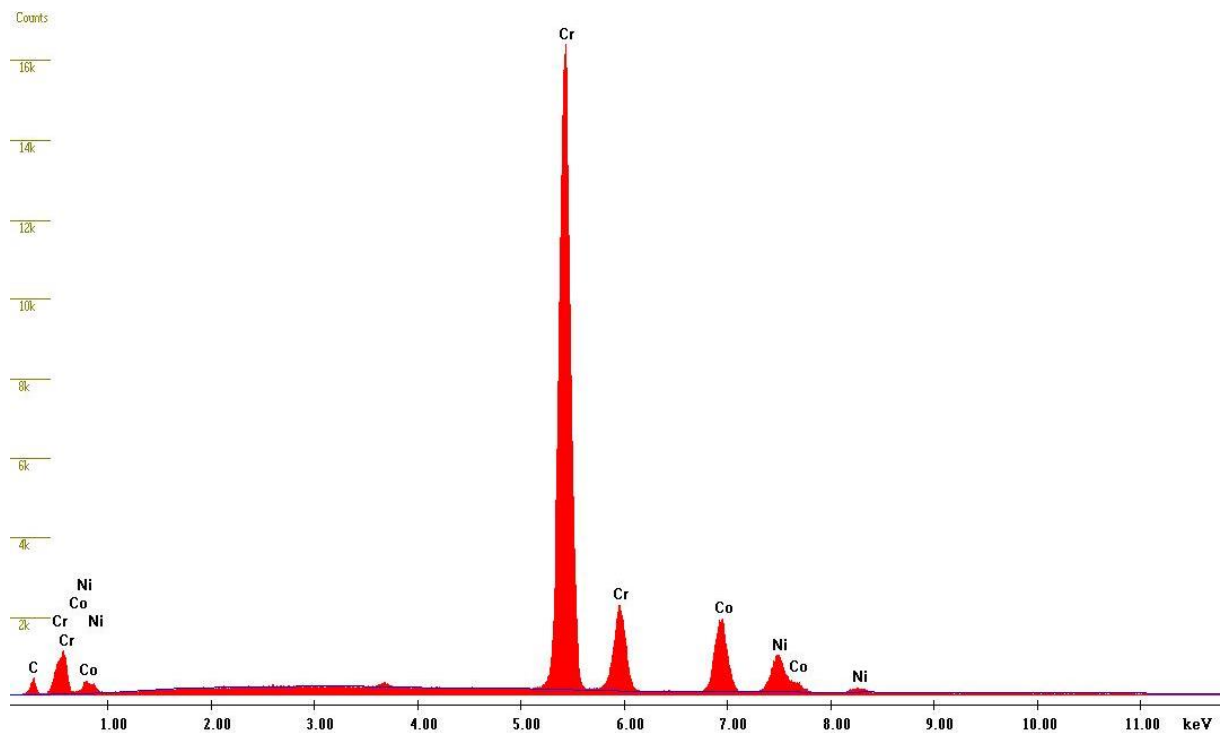
Tab. 1 – Rozdělení typických způsobů nanášení povlaků a jejich vlastnosti [2].	23
Tab. 2 - Provozní parametry a vlastnosti jednotlivých nástřiků [6,32,39].	27
Tab. 3 - Aplikace HVOF nástřiků pro jednotlivá odvětví průmyslu [2,3,4,41].	29
Tab. 4 - Parametry měření opotřebení metodou Ball-on-Flat dle ASTM G-133	42
Tab. 5 - Parametry měření opotřebení metodou dry sand rubber wheel test dle G-65.....	44
Tab. 6 - Chemické složení prášku Amperit 594.074	45
Tab. 7 - Parametry žárového nástřiku.....	45
Tab. 8 - Parametry laserového ovlivnění série 1.	46
Tab. 9 - Parametry laserového ovlivnění série 2.	48
Tab. 10 - Vybrané parametry laserového ovlivnění pro další měření a analýzu.	49
Tab. 11 - Chemické složení neovlivněného nástřiku měřené pomocí EDX analýzy.	52
Tab. 12 - Chemické složení ovlivněného nástřiku měřené pomocí EDX analýzy.	53
Tab. 13 - Chemické složení přetaveného nástřiku měřené pomocí EDX analýzy.	54
Tab. 14 - Naměřené hodnoty mikrotvrdosti pro neovlivněný nástřik.	56
Tab. 15 - Naměřené hodnoty mikrotvrdosti pro ovlivněný nástřik.	57
Tab. 16 - Naměřené hodnoty mikrotvrdosti pro přetavený nástřik.	58
Tab. 17 - Výsledné hodnoty měření drážky pomocí profilometru pro neovlivněný povlak. .	59
Tab. 18 - Výsledné hodnoty měření drážky pomocí profilometru pro ovlivněný povlak.	61
Tab. 19 - Výsledné hodnoty měření drážky pomocí profilometru pro přetavený povlak.	63
Tab. 20 - Výsledné hodnoty měření testu dle ASTM G-65 pro neovlivněný nástřik.....	65
Tab. 21 - Výsledné hodnoty měření testu dle ASTM G-65 pro ovlivněný nástřik.	67
Tab. 22 - Výsledné hodnoty měření testu dle ASTM G-65 pro přetavený nástřik.....	69
Tab. 23 - Vybrané parametry laserového ovlivnění.	71

Seznam příloh

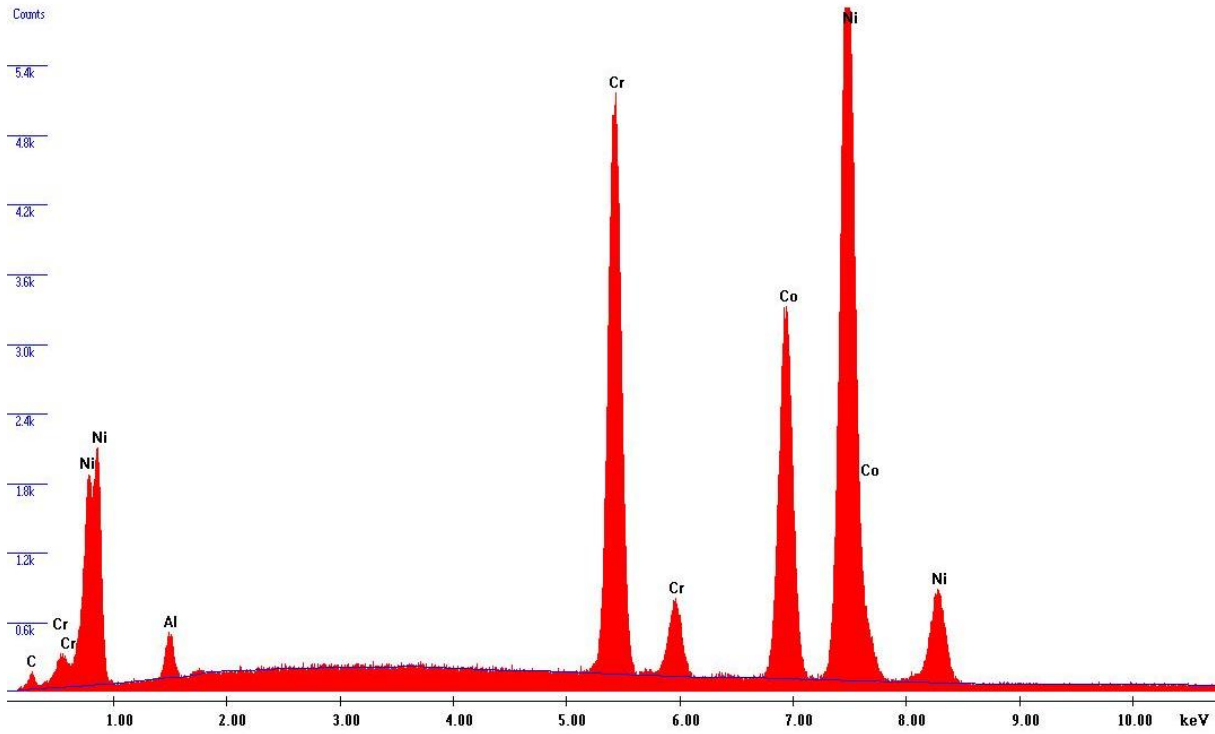
- Obrázek 1** - Graf spektra prvkového složení pro neovlivněný nástřik v místě měření 1.
- Obrázek 2** - Graf spektra prvkového složení pro neovlivněný nástřik v místě měření 2.
- Obrázek 3** - Graf spektra prvkového složení pro neovlivněný nástřik v místě měření 3.
- Obrázek 4** - Graf spektra prvkového složení pro ovlivněný nástřik v místě měření 1.
- Obrázek 5** - Graf spektra prvkového složení pro ovlivněný nástřik v místě měření 2.
- Obrázek 6** - Graf spektra prvkového složení pro ovlivněný nástřik v místě měření 3.
- Obrázek 7** - Graf spektra prvkového složení pro přetavený nástřik v místě měření 1.
- Obrázek 8** - Graf spektra prvkového složení pro přetavený nástřik v místě měření 2.
- Obrázek 9** - Graf spektra prvkového složení pro přetavený nástřik v místě měření 3.
- Obrázek 10** - Graf spektra prvkového složení pro přetavený nástřik v místě měření 4.
- Obrázek 11** - Graf spektra prvkového složení pro přetavený nástřik v místě měření 5.
- Obrázek 12** - Graf spektra prvkového složení pro přetavený nástřik v místě měření 6.
- Obrázek 13** - Difraktogram pro ovlivněný nástřik.
- Obrázek 14** - Difraktogram pro přetavený nástřik.



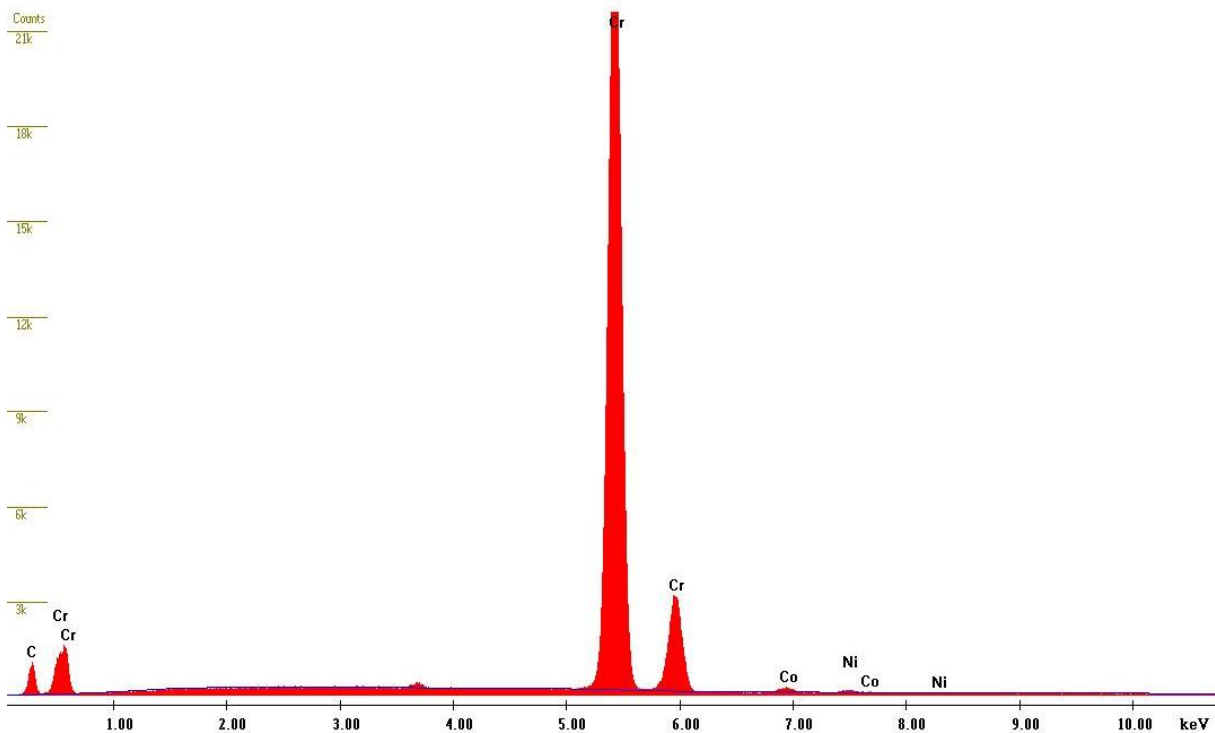
Obrázek 1 - Graf spektra prvkového složení pro neovlivněný nástřík v místě měření 1.



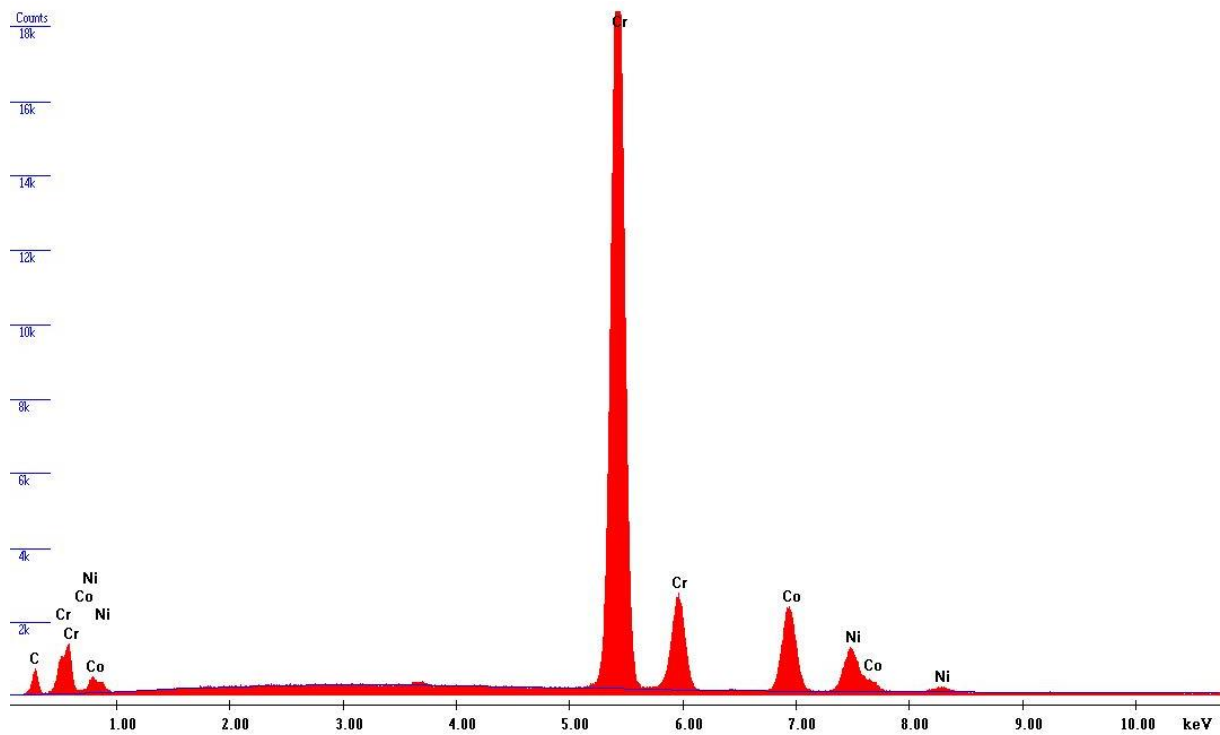
Obrázek 2 - Graf spektra prvkového složení pro neovlivněný nástřík v místě měření 2.



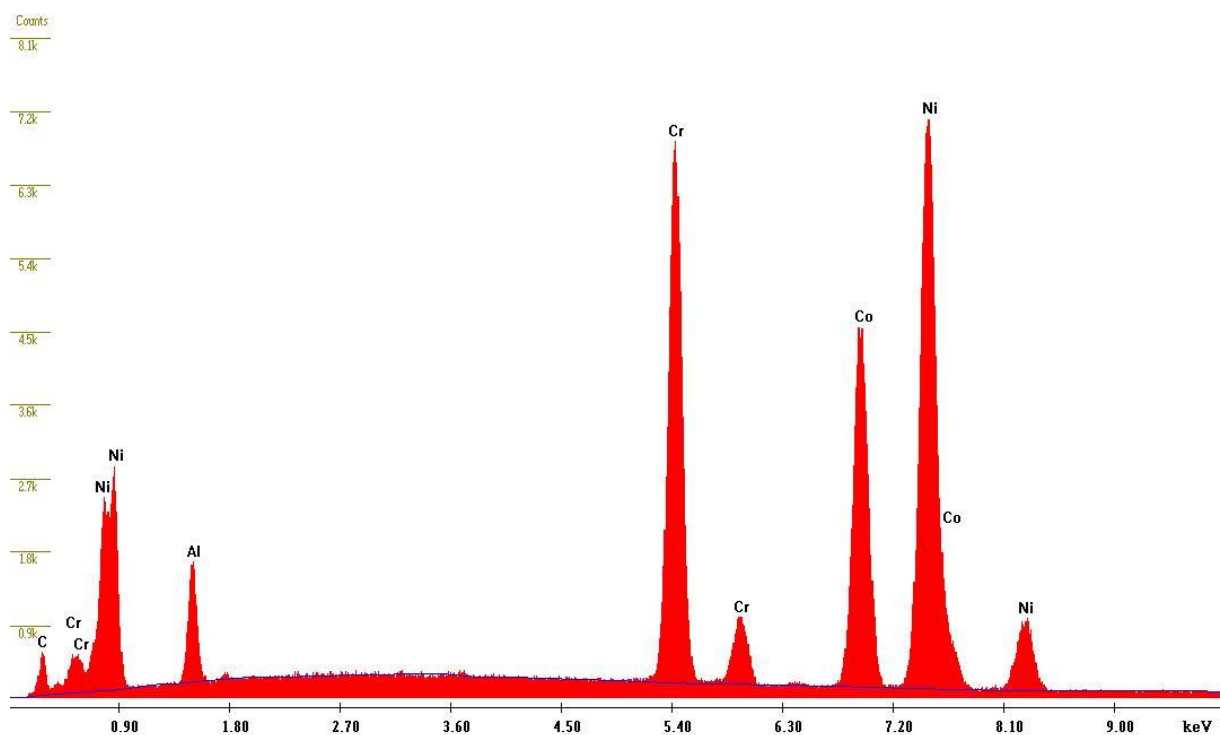
Obrázek 3 - Graf spektra prvkového složení pro neovlivněný nástřik v místě měření 3.



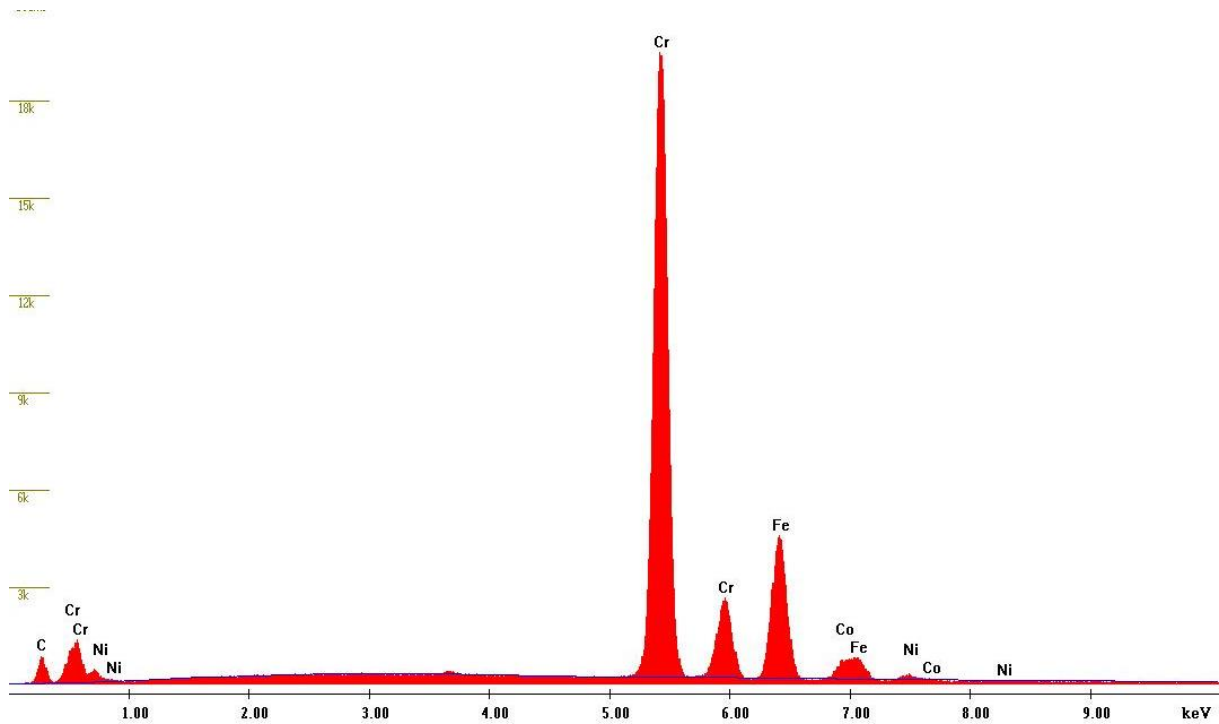
Obrázek 4 - Graf spektra prvkového složení pro ovlivněný nástřik v místě měření 1.



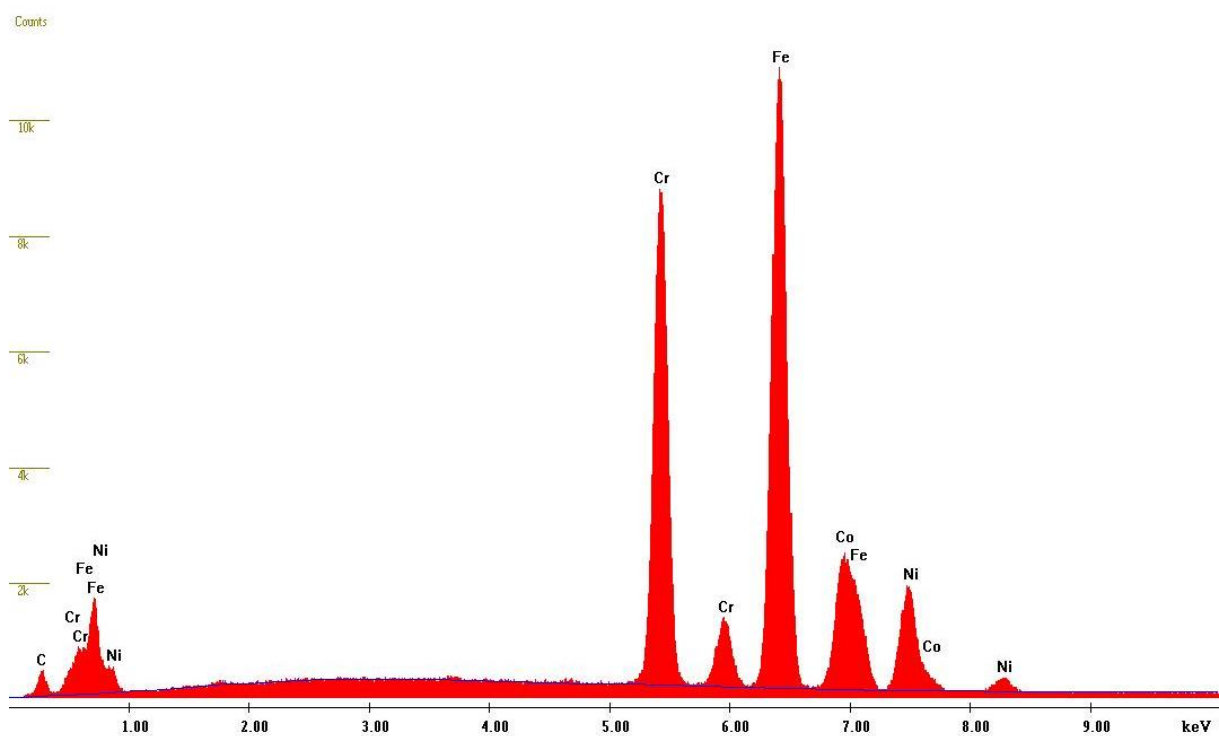
Obrázek 5 - Graf spektra prvkového složení pro ovlivněný nástřik v místě měření 2.



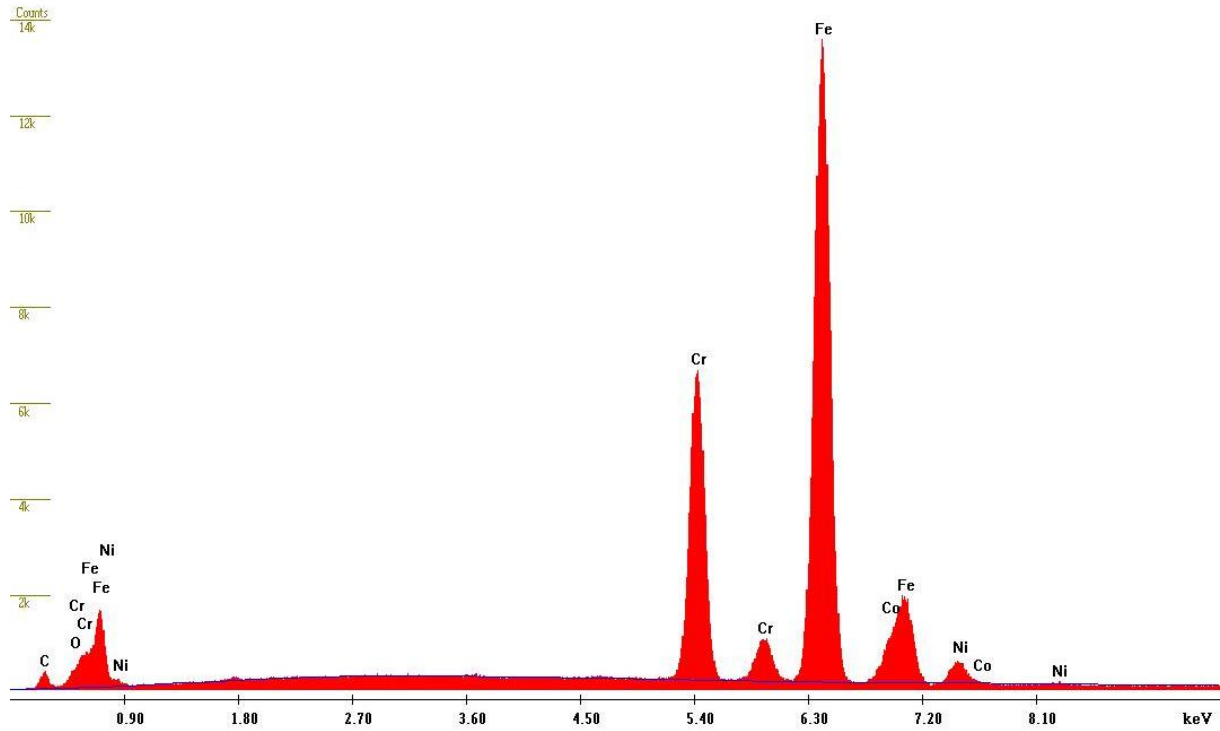
Obrázek 6 - Graf spektra prvkového složení pro ovlivněný nástřik v místě měření 3.



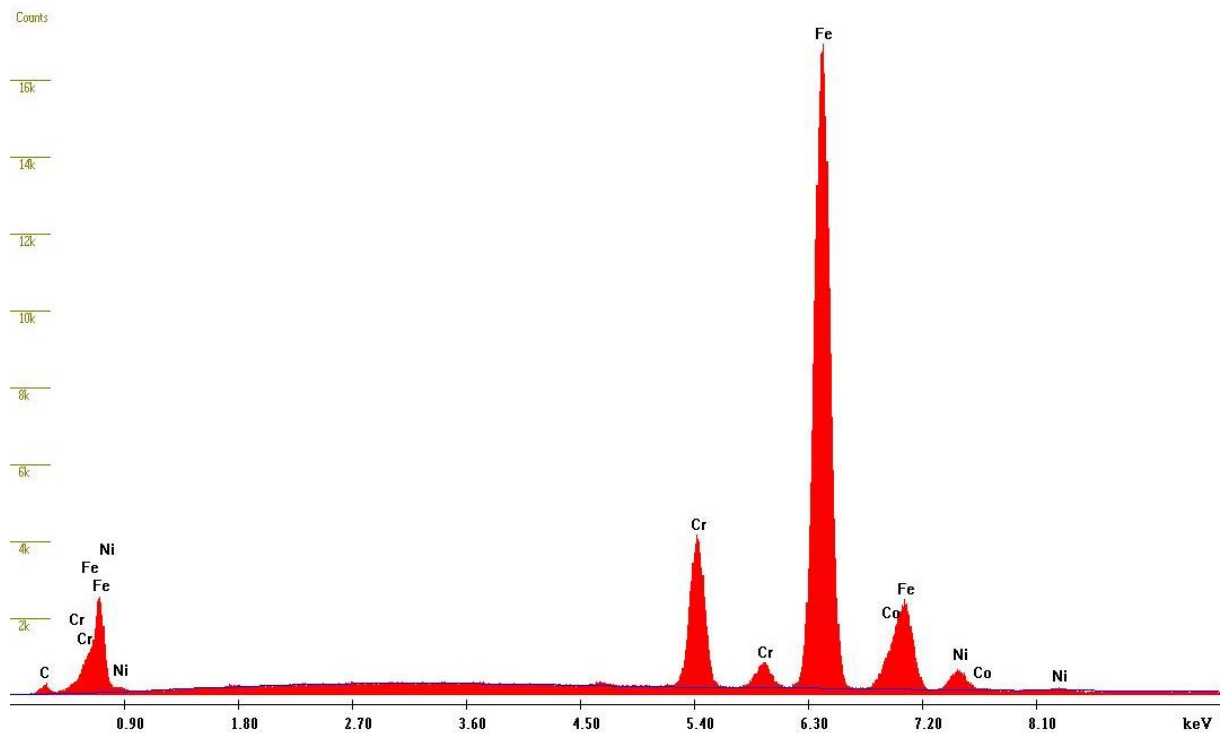
Obrázek 7 - Graf spektra prvkového složení pro přetavený nástřik v místě měření 1.



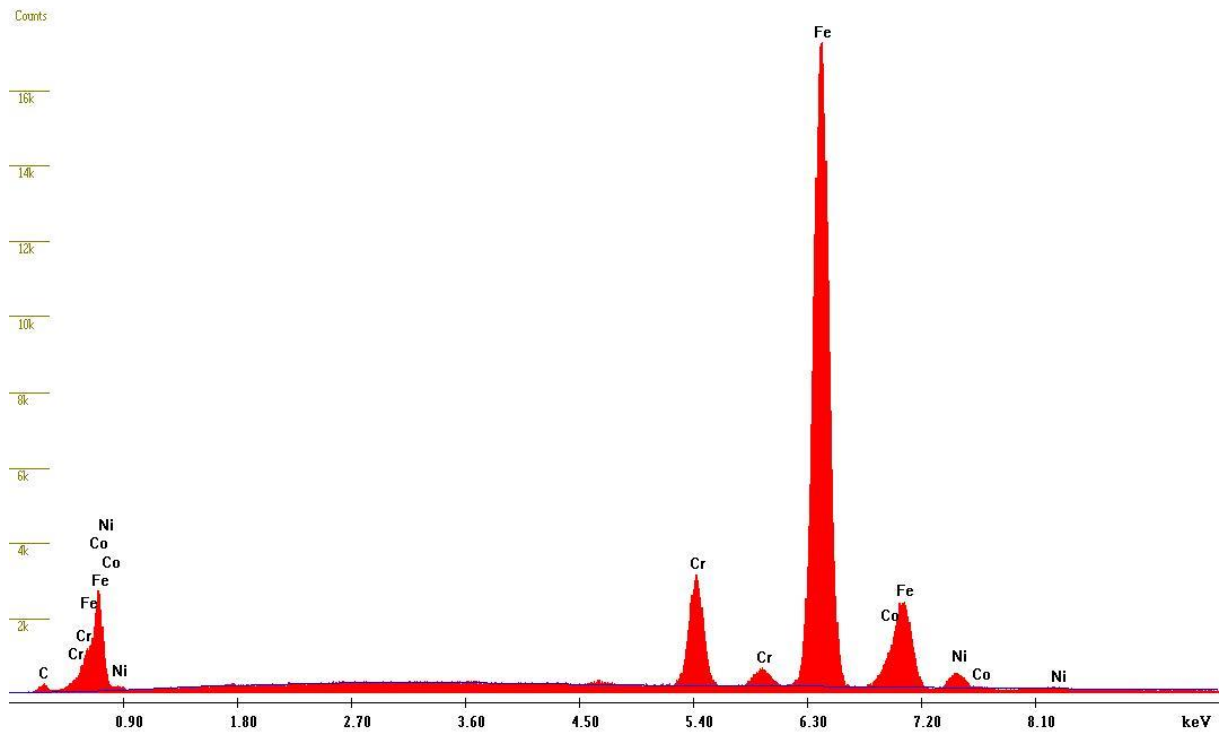
Obrázek 8 - Graf spektra prvkového složení pro přetavený nástřik v místě měření 2.



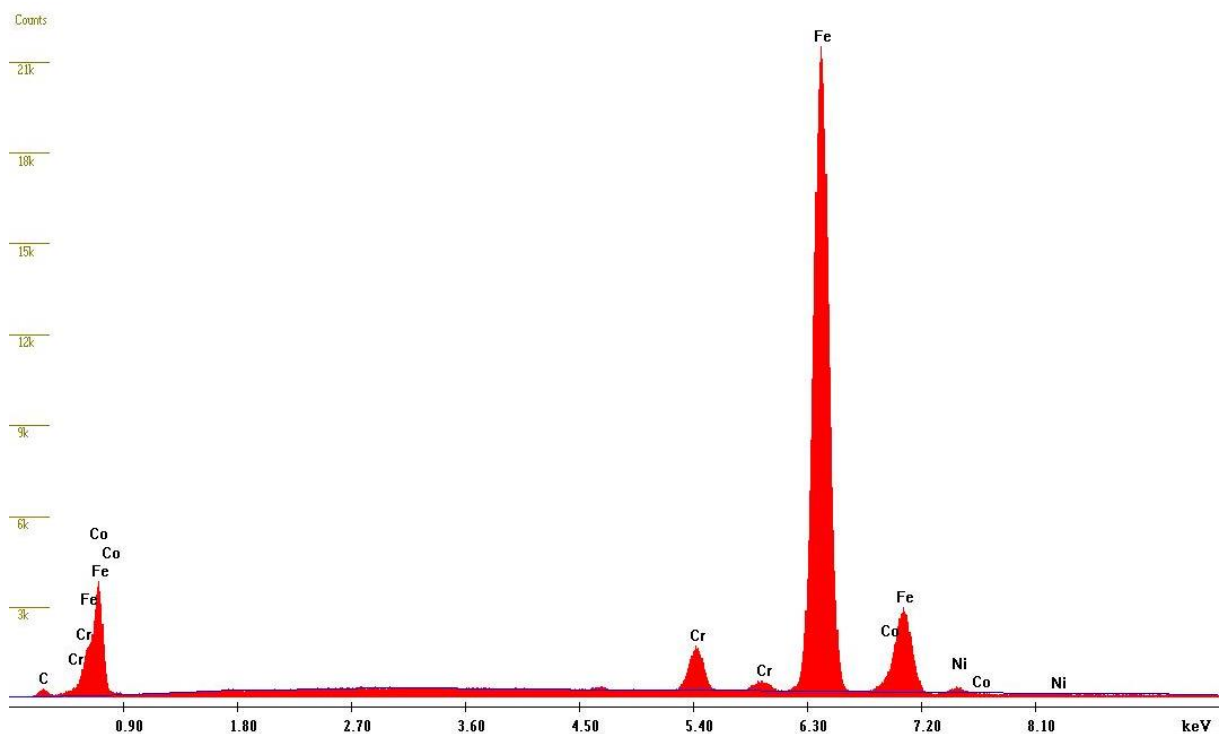
Obrázek 9 - Graf spektra prvkového složení pro přetavený nástřik v místě měření 3.



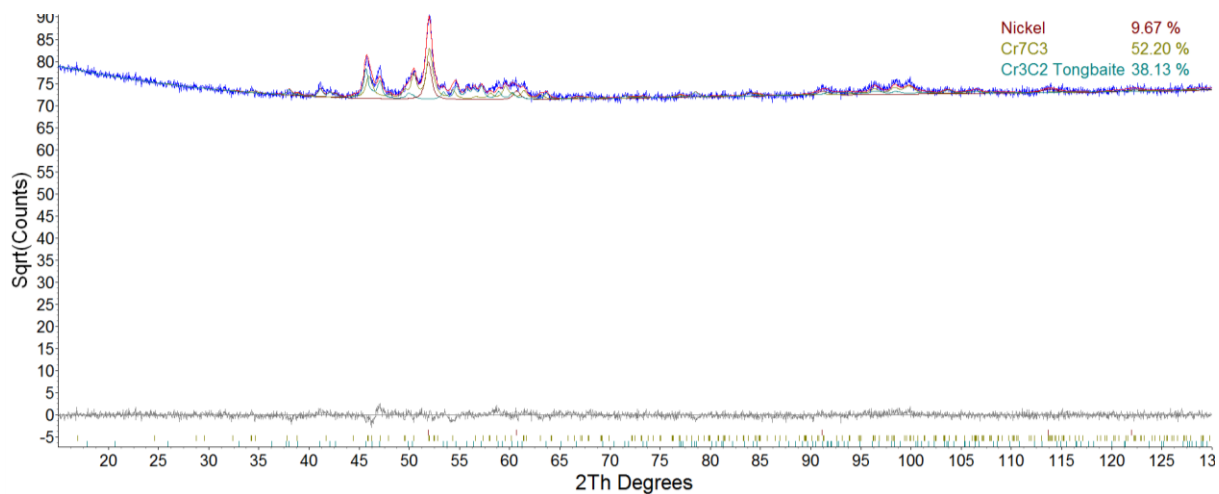
Obrázek 10 - Graf spektra prvkového složení pro přetavený nástřik v místě měření 4.



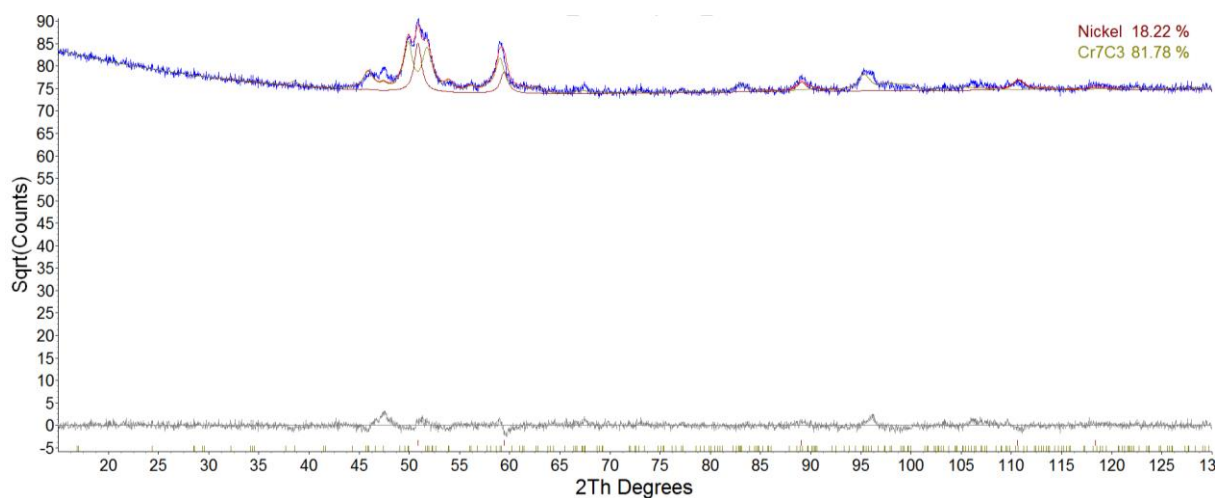
Obrázek 11 - Graf spektra prvkového složení pro přetavený nástřík v místě měření 5.



Obrázek 12 - Graf spektra prvkového složení pro přetavený nástřík v místě měření 6.



Obrázek 13 - Difraktogram pro ovlivněný nástřík.



Obrázek 14 - Difraktogram pro přetavený nástřík.