

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA STROJNÍ

Studijní program:N2301 Strojní inženýrství

Studijní obor:3911T016 Materiálové inženýrství a strojírenská metalurgie

DIPLOMOVÁ PRÁCE

**Aplikace technologie laserového přetavení HVOF stříkaných
povlaků ke zvýšení kvality povlaků na bázi Co**

Autor: **Bc. Petr Marchevka**

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

Akademický rok 2013/2014

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Petr MARCHEVKA**
Osobní číslo: **S12N0078P**
Studijní program: **N2301 Strojní inženýrství**
Studijní obor: **Materiálové inženýrství a strojírenská metalurgie**
Název tématu: **Aplikace technologie laserového přetavení HVOF stříkaných povlaků ke zvýšení kvality povlaků na bázi Co**
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. Současný stav poznání - literární rešerše z oblasti žárových nástřiků a možností jejich následného zpracování, průmyslových laserových technologií povrchových úprav
3. Optimalizace parametrů laserového přetavení HVOF nástřiků na bázi Co s ohledem na mikrostrukturu, vznik trhlin a vznik metalurgické vazby
4. Porovnání mikrostruktury a vlastností povlaku po nástřiku a po aplikaci laserového přetavení
5. Diskuze výsledků - posouzení vlivu technologie přetavení na sledované vlastnosti
6. Závěr

Rozsah grafických prací: fotodokumentace, obrázky
Rozsah pracovní zprávy: 50-70 stran
Forma zpracování diplomové práce: tištěná/elektronická
Seznam odborné literatury:


- <http://www.kmm.zcu.cz/CD/index.htm> (Š. Houdková, R. Enžl, O. Bláhová: Žárové nástřiky - moderní technologie povrchových úprav)
- Houdková, Š., Vostřák, M., Hruška, M., Říha, J., Smazalová, E., Česánek, Z., Schubert, J.: Comparison of NiCrBSi coatings, remelting by flame and by High -power laser. Sborník konference METAL 2013, 15. - 17. 5. 2013, Brno, Czech Republic, EU
- Vostřák, M., Houdková, Š., Hruška, M.: Laser re-melting of HVOF sprayed NiCrBSi coatings. Sborník konference METAL 2013, 15. - 17. 5. 2013, Brno, Czech Republic, EU
- Buchfink, G.: Laser as a tool. Vogel Buchverlag, 2007
- Moskowitz, L., Trelewicz, K.: HVOF Coatings for Heavy-Wear, High-Impact Applications, J.Therm. Spray Technol., Vol 6, (3),1997, p. 294-299
- Ocelík, V., de Oliveira, U., de Boer, M., de Hosson, J.Th.M.: Thick Co-based coating on cast iron by side laser cladding: Analysis of processing conditions and coating properties. Surf. Coat. Technol. 201 (2007) 5875-5883

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: 23. září 2013
Termín odevzdání diplomové práce: 23. května 2014


Doc. Ing. Jiří Staněk, CSc.
děkan




Prof. Ing. Václav Mentl, CSc.
vedoucí katedry

V Plzni dne 23. září 2013

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 MARCHEVKA	Jméno Petr		
STUDIJNÍ OBOR	3911T016 „Materiálové inženýrství a strojírenská metalurgie“			
VEDOUcí PRÁCE	Příjmení (včetně titulů) Ing. Houdková - Šimůnková, Ph.D.	Jméno Šárka		
PRACOVIŠTĚ	ZČU - FST - KKS			
DRUH PRÁCE	DIPLOMOVÁ	BAKALÁŘSKÁ	Nehodící se škrtněte	
NÁZEV PRÁCE	Aplikace technologie laserového přetavení HVOF stříkaných povlaků ke zvýšení kvality povlaků na bázi Co			

FAKULTA	strojní	KATEDRA	KMM	ROK ODEVZD.	2014
----------------	---------	----------------	-----	--------------------	------

POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

CELKEM	70	TEXTOVÁ ČÁST	70	GRAFICKÁ ČÁST	0
---------------	----	---------------------	----	----------------------	---

STRUČNÝ POPIS (MAX 10 ŘÁDEK) ZAMĚŘENÍ, TÉMA, CÍL POZNATKY A PŘÍNOSY	<p>Tato diplomová práce je zaměřena na aplikaci technologie laserového přetavení HVOF stříkaných povlaků ke zvýšení kvality povlaků na bázi Co. Žárový nástřík Stellitu 6 byl laserově přetaven pomocí vysokovýkonného diodového laseru. Charakterizace HVOF nástříků a vzorků po laserové modifikaci byla provedena pomocí světelné mikroskopie, SEM/EDX a rovněž byly provedeny měření tvrdosti, odolnosti proti opotřebení a zbytkového napětí.</p> <p>Výsledky naznačují, že lze plně kontrolovat hloubku protavení a stupeň protavení žárového nástříku. Částečným přetavením došlo k homogenizaci struktury a k výraznému zvýšení odolnosti proti opotřebení.</p>
KLÍČOVÁ SLOVA	laserové navařování, laserové přetavení, HVOF, Stellite 6, charakteristika depozitu

SUMMARY OF DIPLOMA SHEET

AUTHOR	Surname MARCHEVKA	Name Petr	
FIELD OF STUDY	3911T016 “ Materials Engineering and Engineering Metallurgy“		
SUPERVISOR	Surname (Inclusive of Degrees) Ing. Houdková - Šimůnková, Ph.D.	Name Šárka	
INSTITUTION	ZČU - FST - KKS		
TYPE OF WORK	DIPLOMA	BACHELOR	Delete when not applicable
TITLE OF THE WORK	Laser surface modification of HVOF coatings for improvement quality and properties of Cobalt based coatings		

FACULTY	Mechanical Engineering	DEPARTMENT	Material Science and Technology	SUBMITTED IN	2015
----------------	------------------------	-------------------	---------------------------------	---------------------	------

NUMBER OF PAGES (A4 and eq. A4)

TOTALLY	70	TEXT PART	70	GRAPHICAL PART	0
----------------	----	------------------	----	-----------------------	---

BRIEF DESCRIPTION TOPIC, GOAL, RESULTS AND CONTRIBUTIONS	<p>This diploma thesis aims to investigate the effects of laser surface treatment on the microstructure and wear performance for Stellite 6 HVOF sprayed coatings onto the steel substrate. Laser surface treatments have been carried out using a 4 kW high power diode laser. Wear behaviour was measured by Ball-on-Flat test and microhardnesstest of various coatings before and after laser treatment were evaluated. Residual Stress was measured by Hole-Drilling. The results indicated that it was possible to achieve control of melt depth and the degree of melting. Significant improvement of wear resistance and homogenization structures has been achieved after laser treatment.</p>
KEY WORDS	laser cladding, laser meeting, HVOF, Stellite 6, deposition characteristic,

Obsah

Obsah.....	1
Přehled použitých zkratk a symbolů.....	3
Poděkování.....	4
1 Úvod.....	5
2 Laser.....	6
2.1 Princip laseru.....	6
2.2 Typy laserů.....	7
2.2.1 Princip funkce laserových diod.....	7
3 Modifikace povrchu pomocí laseru.....	8
3.1 Úvod a rozdělení metod.....	8
3.2 Tepelné zpracování povrchu laserem (kalení laserem).....	9
3.3 Laserové přetavení.....	11
3.4 Laserové navařování.....	13
3.4.1 Princip metody.....	13
3.4.2 Důležité parametry procesu.....	14
3.4.3 Slitiny přídavného materiálu a substrátu.....	15
3.4.4 Aplikace metody.....	16
3.4.5 Klady a zápory metody.....	16
4 Žárové nástřiky.....	17
4.1 Úvod do problematiky.....	17
4.2 HVOF metoda.....	19
4.2.1 Princip metody HVOF.....	19
4.2.2 Aplikace metody HVOF.....	20
4.2.3 Klady a zápory.....	21
4.3 Metody post-treatmentu.....	23
4.3.1 Tepelná modifikace povrchu.....	24
5 Kobalt.....	26
5.1 Základní popis prvku a jeho výskyt.....	26
5.2 Fyzikální a chemické vlastnosti.....	27
5.3 Použití.....	28
5.4 Kobaltové slitiny.....	29
5.4.1 Slitiny kobaltu s vysokou odolností proti opotřebení.....	29
5.4.2 Slitiny kobaltu pracující za vysokých teplot.....	31
5.4.3 Slitiny kobaltu s vysokou odolností proti korozi.....	31
5.5 Povlaky na bázi kobaltu.....	32
5.5.1 Žárově stříkané.....	32
5.5.2 Navařované laserem – laser cladding.....	34
6 Použité experimentální metody.....	35
6.1 Řádkovací elektronová mikroskopie (SEM).....	35
6.2 Energiově disperzní spektroskopie (EDX).....	36
6.3 Měření tvrdosti.....	36
6.4 Měření zbytkových napětí odvrťovací metodou.....	37
6.5 Měření opotřebení metodou „Ball-on-Flat“.....	37
7 Příprava vzorků.....	38
7.1 Příprava HVOF nástřiku.....	38
7.2 Použitý laser.....	38
8 Optimalizace parametrů laserového přetavení.....	39

8.1	Laserové přetavení a matice parametrů	39
8.2	Mikrostruktura povlaků v závislosti na parametrech přetavení.....	40
8.3	Tloušťka HVOF nástřiku Stellite 6 po laserovém přetavení v závislosti na parametrech.....	43
8.4	Výběr parametrů laserového přetavení – plně přetavený povlak, částečně přetavený povlak	43
9	Mikrostruktura	44
9.1	Mikrostruktura povlaku ve stavu po nástřiku	44
9.2	Mikrostruktura částečně přetaveného nástřiku	45
9.3	Mikrostruktura zcela přetaveného nástřiku	46
10	Tvrdość	47
11	Měření zbytkových napětí odvrtávací metodou	51
11.1	Výsledky měření zbytkových napětí HVOF nástřiku.....	51
11.2	Výsledky měření zbytkových napětí částečně přetaveného nástřiku	52
12	Určení prvkového složení.....	54
13	Odolnost proti opotřebení.....	55
13.1	Výsledky měření odolnosti proti opotřebení HVOF nástřiku	56
13.2	Výsledky měření odolnosti proti opotřebení částečně přetaveného nástřiku	57
13.3	Výsledky měření odolnosti proti opotřebení zcela přetaveného nástřiku.....	58
13.4	Porovnání hodnot výsledků měření odolnosti proti opotřebení.....	59
13.5	Studium mechanismu opotřebení	60
14	Diskuze výsledků	62
15	Závěr.....	65
16	Reference.....	66
17	Citovaná literatura	66
	Seznam obrázků	68
	Seznam grafů.....	69
	Seznam tabulek	69

Přehled použitých zkratk a symbolů

AISI – American Iron and Steel Institute

COF - Coefficient Of Friction – koeficient tření

CVD - Chemical Vapor Deposition - chemická depozice z plynné fáze

EDX - Energiově Disperzní Spektroskopie

HIP - Hot Isostatic Pressing - izostatické lisování za tepla

HRC - Rockwell Hardness – tvrdost dle Rocwella při zatížení 150kgf s indentorem ve tvaru
diamantového kužele

HV0,1 – Vickers Hardness – tvrdost dle Vickerse při zatížení 100gramů

HVOF - Hight Velocity Oxigen Fuel

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

LASER - Light Amplication by Stimulated Emission of Radiation - zesilování světla
stimulovanou emisí záření

PVD - Physical Vapour Deposition- fyzikální depozice z plynné fáze

SEM - Scanning Electron Microscope – řádkovací elektronový mikroskop

TEM – Transmission Electron Microscope - transmisní elektronový mikroskop

Poděkování

Chtěl bych poděkovat všem, kteří jakkoliv přispěli při zpracování mé diplomové práce. V první řadě mé největší poděkování patří Ing. Šárce Houdkové – Šimůnkové Ph.D., vedoucí diplomové práce, která mi byla po celou dobu nápomocna, za její trpělivost, ochotu, užitečné rady a připomínky. Dále bych rád poděkoval Ing. Evě Smazalové, Ing. Michalu Švantnerovi, Ph.D., Ing. Markovi Vostřákovi, Ing. Jarce Savkové a Ing. Petrovi Novákovi, Ph.D. za veškerou pomoc a rady, které mi poskytli. V neposlední řadě bych rád zmínil Markétu Kláskovou a Ondřeje Palána za korekturu textu.

Tato diplomová práce vznikla v rámci projektu CENTEM, reg. č. CZ.1.05/2.1.00/03.0088, který je spolufinancován z ERDF v rámci programu MŠMT OP VaVpI. a za finančního přispění specifického výzkumu SGS-2013-28. "Podpora studentské vědecké činnosti v oblasti materiálového inženýrství".

1 Úvod

Technologie žárových nástřiků, zvláště HVOF metoda, jsou široce rozšířené techniky pro vytváření ochranných vrstev. Použití je rozšířené napříč různými průmyslovými odvětvími pro schopnost chránit materiál proti různým degradačním procesům, jako například opotřebení, eroze, vysoká teplota nebo atmosférická koroze.

Procesy laserové modifikace povrchu jsou techniky, které mají velký potenciál zlepšit vlastnosti žárových nástřiků. Laserové přetavení nebo povrchové kalení nabízí mnoho výhod. Jednou z nich je přesná kontrola hloubky laserové modifikace, což může snížit teplotní zatížení substrátu. Procesy laserové modifikace jsou nekontaktní, vhodné pro komponenty komplikovaných tvarů a lehce automatizovatelné.

Bylo publikováno několik studií, které studovaly zlepšení tvrdosti a/nebo odolnosti proti opotřebení HVOF nástřiků pomocí laserové modifikace. Jako příklad může být uvedena práce Chen, H., která hodnotila abrazivní opotřebení HVOF nástřiků a laserově přetavené WC-Co nástřiků.[1]

Tato práce je zaměřena na využití vysokovýkonného diodového laseru ISL-400L. Byla provedena optimalizace parametrů laserové modifikace povrchu HVOF nástřiku Stellite 6 a zhodnoceny výsledné vlastnosti přetavených povrchů povlaků.

Charakterizování HVOF nástřiků a vzorků po laserové modifikaci probíhalo následujícími metodami:

- Morfologie nástřiku (světelná mikroskopie, SEM)
- Prvkové složení (EDX)
- Měření tvrdosti (dle Vickerse)
- Měření opotřebení („Ball-on-Flat“ test)
- Měření zbytkových napětí (odvrtávací metoda)

V práci byla studována mikrostruktura HVOF nástřiku a přetavených vzorků pro zjištění změn popřípadě promísení se substrátem. Dále byl změřen průběh tvrdosti nebo odvrtávací metodu byly zjištěny zbytková napětí.

Závěrečným krokem vyhodnocení bylo zjištění změny odolnosti proti opotřebení vlivem laserové modifikace povrchu HVOF nástřiku.

2 Laser

Slovo „LASER“ je akronymem anglického názvu Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation, což lze přeložit jako „zesilování světla stimulovanou emisí záření“. Definice říká, že laser je kvantový generátor a zesilovač koherentního (vnitřně uspořádaného, sfázovaného) optického záření, které vyniká extrémní monochromaticností (tj. všechny fotony tohoto záření mají stejnou „barvu“, respektive vlnovou délku a frekvenci), nízkou rozbíhavostí (divergencí) svazku (všechny fotony laserového záření se pohybují stejným směrem) a vysokou hustotou přenášeného výkonu či energie. Žádné jiné záření, než záření generované laserem tyto vlastnosti nemá. Vlnové délky laserového záření spadají od mikrovlnné oblasti, přes infračervené tepelné záření a viditelné světlo až po rentgenové paprsky.[2]

2.1 Princip laseru

Ačkoliv existuje velké množství různých typů laserových generátorů, každý v sobě zahrnuje tři základní součásti: laserové aktivní prostředí, ve kterém probíhá zesilování záření, zdroj čerpání pro excitaci aktivního prostředí a rezonátor vytvářející zpětnou vazbu mezi zářením a aktivním prostředím vedoucí ke vzniku laserových oscilací.

Základní význam pro funkci laseru má proces stimulované emise, který může nastat 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 $h\nu = E_2 - E_1$ (h je Planckova konstanta). Podstatné je, že i ostatní vlastnosti emitovaného fotonu jsou stejné jako u fotonu, který emisi stimuloval. Toto je podstatou zesilování světla.

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. 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. [2]

Od záření běžných světelných zdrojů (plynové výbojky, žárovky) se odlišuje laserové světlo následujícími vlastnostmi:

- Záření je prostorově koherentní, to znamená, že vlny emitované z různých míst aktivního prostředí mají pevný fázový vztah.
- Záření se v prostoru nešíří všemi směry, ale v úzkém svazku.
- Laser emituje postupné vlnění se zanedbatelnými fázovými nestabilitami - laserové záření je časově koherentní. S tím je svázaná vysoká přesnost frekvence (monochromaticnost) záření.
- Laser umožňuje generovat extrémně krátké světelné impulsy. Při použití pulzního laseru lze v úzké oblasti vlnových délek uvolnit optický výkon o hodnotách od 1010 do 1013 W. Vysoká intenzita elektrického pole v takovém laserovém paprsku vedla k odhalení zcela nových fyzikálních efektů interakce světla a hmoty (nelineární optika).

2.2 Typy laserů

Jak již bylo zmíněno v úvodu, existuje mnoho různých tříd laserů, jejich základní princip je sice stejný, ale liší se výrazně konstrukcí a realizací jednotlivých částí. Dělení laserů do jednotlivých skupin probíhá podle několika kritérií.

Podle skupenství aktivního prostředí se lasery dělí na pevně látkové, kapalinové, plynové a plazmatické. Zvláštní třídu přitom tvoří lasery polovodičové - laserové diody.

Podle režimu generace se pak lasery dělí na dvě velké třídy: na kontinuální (často označované zkratkou CW) a na pulzní lasery. Pulzní se dále dělí na lasery pracující v režimu volné generace (délka impulsů řádově 10^{-4} s), lasery pracující v režimu spínání zisku (často označované jako Q-spínání, délka impulsů řádově 10^{-8} s) a na lasery pracující v režimu synchronizace módů (délka impulsů řádově 10^{-12} s).

Podle způsobu čerpání se lasery rozdělují na opticky (a to buď koherentně, nebo nekoherentně) čerpané, na lasery čerpané elektrickým výbojem, chemickou reakcí, elektronovým svazkem atd.

Podle frekvenční oblasti, ve které je laserové záření generované se lasery dělí na submilimetrové, infračervené, viditelné, ultrafialové a rentgenové.[2]

2.2.1 Princip funkce laserových diod

Základem funkce všech laserů je proces stimulované emise. U polovodičových laserů - laserových diod je však tento proces specifický v tom, že v polovodičových krystalech jsou aktivní atomy hustě vedle sebe a zářivé přechody se neuskutečňují mezi diskretními energetickými hladinami, ale mezi energetickými pásy. Elektrony obsazují nejnižší energetické hladiny ve vodivostním pásu až po Fermiho kvazihladinu pro elektrony E_{fn} . Stav ve valenčním pásu jsou bez elektronů až po Fermiho kvazihladinu pro díry E_{fp} (plyne z principu zachování neutrality náboje). Při dopadu fotonů na polovodič s energií větší než E_g (šířka zakázaného pásu [eV]), ale menší než $E_{fn}-E_{fp}$, nemůže dojít k jejich absorpci, protože hladiny, na něž by se mohl uskutečnit přechod spojený s pohlcením fotonu, jsou již obsazeny. Dopadající fotony tedy mohou stimulovat přechody elektronů z vodivostního do valenčního pásu s následnou emisí nerozlišitelných fotonů od budících. Podmínka pro jejich stimulaci je [3]:

$$E_g < h\nu < E_{fn} - E_{fp} .$$

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, jak je tomu i ve všech generátorech, v důsledku zavedení kladné zpětné vazby, která část zesíleného signálu z výstupu přivádí na vstup. K tomuto účelu se používají různé typy rezonátorů, selektivních odražečů nebo rozložené zpětné vazby. V současnosti je nejužívanějším rezonátorem v polovodičových laserech Fabry-Perotův rezonátor. Vzhledem k tomu, že poměrný index lomu rozhraní polovodičový krystal - vzduch má poměrně vysokou hodnotu (pro GaAs je $n_r=3,34$) nemusíme u injekčních polovodičových laserů používat speciální zrcadla, stačí využít odrazu elektromagnetické vlny od rozhraní. Podmínkou realizace takového rezonátoru je pak vzájemná rovnoběžnost dvou protilehlých stěn polovodičového laseru a jejich kolmost k rovině přechodu PN. V kubických krystalech se zrcadla rezonátoru získávají štípáním orientovaných polovodičových destiček s přechodem PN podél krystalografických rovin.[3]

Při nízkých proudech tekoucích přes přechod PN v přímém směru dochází ke generování spontánního záření šířícího se ve všech směrech s náhodnou fází. Růst proudu zvyšuje rychlost zářivé rekombinace, což vede k růstu hustoty fotonového toku. Generované fotony stimulují další rekombinace. Vzhledem k tomu, že největší počet generovaných fotonů má energii rovnou energii maxima spektrálního rozdělení spontánní emise, nastává pro tuto energii nejvíc vynucených přechodů ve srovnání s jinými oblastmi spektrálního rozdělení. Tato okolnost pak vede k postupnému zužování spektra spontánní emise a výraznému růstu intenzity vyzařování v oblasti maxima spektrálního rozdělení emise. Roste-li intenzita vyzařování nelineárně s růstem buzení, nazýváme tento proces superluminiscence. Fotony generované v procesu superluminiscence se šíří stejně jako ve spontánním režimu ve všech směrech s náhodnou fází. Přechod k laserovému režimu nastává, když se stimulované zesílení rovná ztrátám a záření se stává koherentním. Koherence dosahujeme použitím optického rezonátoru, který zajistí selektivní zesílení elektromagnetické vlny s určitou frekvencí a definovanou fází, čímž vzniká stojaté vlnění. Stupeň koherence je dán kvalitou rezonátoru.[3]

3 Modifikace povrchu pomocí laseru

3.1 Úvod a rozdělení metod

Laserové modifikace povrchu slouží ke změně složení a mikrostruktury v povrchové vrstvě materiálu. Díky těmto změnám lze dosáhnout požadovaných vlastností. Mezi požadované vlastnosti patří např. odolnost proti opotřebení, které je zvýšena pomocí zpevňování povrchu. Další významně požadovanou vlastností je odolnost proti únavě, kterou můžeme dosáhnout například zvýšením zbytkových tlakových pnutí v povrchové vrstvě zpracovaného materiálu. Mezi laserové modifikace povrchu můžeme zahrnout pět hlavních skupin, které se ještě dále dělí.[4]

1. Tepelné zpracování povrchu laserem (Laser hardening)
2. Laserové přetavení (Laser melting)
3. Depozice materiálu s využitím laseru
 - a) Laserové navařování (Laser cladding)
 - b) Legování povrchu
 - c) Vstřelování nenatavených částic do laserem nataveného substrátu (Laser Melt/Particle Injection)
4. Laserem asistovaná fyzikální depozice z plynné fáze (LAPVD)
5. Vytvrzování povrchu materiálu rázovou vlnou pomocí laseru (Laser shock peening)

Pro vysvětlení jednotlivých pojmů zde bude zmíněn zjednodušený popis těchto metod. Jednotlivé metody se však navzájem částečně prolínají a nelze je exaktně rozdělit. Dále bude pozornost zaměřena na tepelné zpracování povrchu, laser melting a laser cladding.

Při tepelném zpracování povrchu nedochází k natavení povrchu na rozdíl od laserového přetavení. Při této metodě je naopak požadavek natavit malou vrstvičku materiálu, díky velmi vysokému stupni ochlazování natavené vrstvičky dochází ke zpevňování změnou struktury. Pro depozici materiálu zase platí, že je přidáván materiál do roztaveného podkladového substrátu. Přídavný materiál může být v podobě legujících prvků (legování povrchu), tvrdých částic, které se během zpracování neroztaví (laser melt/partije injection), nebo v podobě slitin (laserové navařování). Pro laserem asistovanou fyzikální depozici z plynné fáze platí, že je materiál deponován v plynné podobě a ani zde se neobjevuje kapalná fáze. Deponovaný materiál je velice rychle ohřátý pomocí laseru a dochází k sublimaci. Poslední metodou je shock peening, při které dochází ke vzniku šokových vln a tím se v materiálu zvyšuje povrchové napětí.[4]

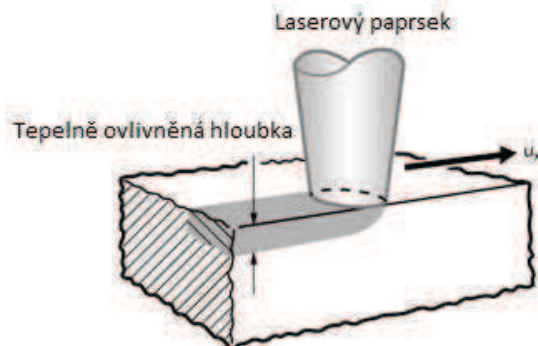
Parametry pro modifikace povrchu pomocí laseru závisí na druhu modifikace (např. laserové přetavování, laserové navařování...), na termofyzikálních vlastnostech zpracovaného materiálu (např. tepelná kapacita) a na optických vlastnostech. Důležité parametry jsou energie laserového paprsku a doba interakce s povrchem, což je funkce intenzity paprsku, rychlosti pohybu vzorku (laseru) a průměru paprsku.[4]

Použití těchto metod je velice široké a můžeme ho najít ve velké části průmyslové praxe. Zřejmě nejrozšířenější je stále tepelné zpracování (povrchové kalení). Jednotlivé metody se mohou uplatňovat v kosmonautice, leteckém, automobilovém průmyslu, v biomedicině, ale i pro běžné průmyslové aplikace.

3.2 Tepelné zpracování povrchu laserem (kalení laserem)

Tepelné zpracování povrchu laserem je vystavení povrchu materiálu tepelnému cyklu. Tento cyklus se skládá z rychlého ohřevu a následného ochlazení, které není způsobené chladícím médiem. V případě zpracování oceli dochází nejprve k austenitizaci a následuje zakalení a vzniku indukovaného martenzitu. Během procesu ohřevu nedochází ke vzniku kapalně fáze, tudíž všechny přeměny jsou v tuhém stavu. Tento proces je podobný běžnému povrchovému kalení. Na obrázku níže (Obrázek 3:1,[5]) je zachycen proces povrchového kalení na zjednodušeném nákresu.[6]

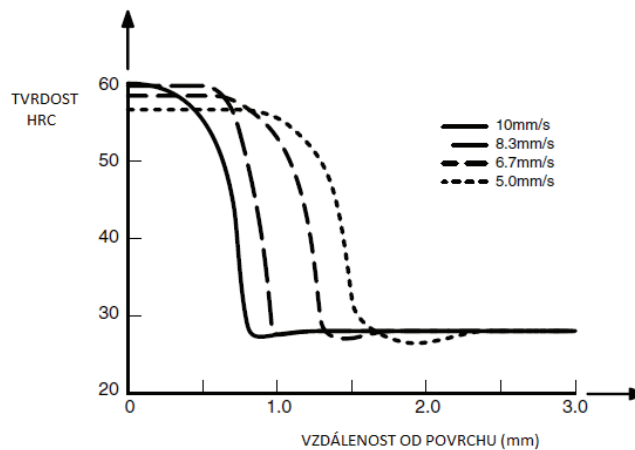
Zpevnění oceli vznikem martenzitu výrazně ovlivní vlastnosti povrchové vrstvy. Díky tepelnému zpracování dochází ke zvýšení odolnosti povrchu proti opotřebení. Příkladem takto zpracovaných komponentů jsou části posilovače řízení, vačkové hřídele, vedení automobilových ventilů, vložky válců nebo pracovní plochy ozubených kol.[6]



Obrázek 3:1. Povrchové kalení laserem[5]

Důležitými parametry procesů, které výrazně ovlivní výslednou laserem zpracovanou oblast (tvrdost, hloubku prokalení, mikrostrukturu a zbytkové napětí) jsou:

1. Energie laserového svazku, průměr paprsku, rychlost pohybu vzorku (laseru)
2. Druh atmosféry při zpracování (ochranný plyn)
3. Množství absorbované energie laseru vzorkem
4. Materiál vzorku a jeho původní mikrostruktura



**Obrázek 3:2. Závislost tvrdosti na vzdálenosti od povrchu při použití různých rychlostí pohybu laseru.
(Ocel AISI 4340, tepelně zpracovaná při teplotě 649°C, 2hod; laser 1,8 kW)[7]**

Na obrázku výše (Obrázek 3:2) je příklad závislosti změny tvrdosti na rychlosti pohybu laseru.

Nejen ocel může být vystavena povrchovému zpracování s užitím laseru, je známo také zpracování neželezných slitin. U těchto slitin dochází ke změně vlastností díky precipitačnímu vytvrzování. Tvrdost některých slitin hliníku může být tímto zpracováním zvýšena až o 100%. Pro toto precipitační vytvrzení je nutné, aby slitina měla změnu rozpustnosti v tuhém stavu. Vytvořením přesyceného roztoku, při rychlém ochlazení a následných procesech stárnutí, dojde ke změně povrchových vlastností materiálu. Při zpracování dochází k velice rychlému ohřátí materiálu pouze v jeho malém objemu a následuje rychlé ochlazení v důsledku velkého teplotního gradientu. Proto můžeme rozdělit proces na dvě fáze.[4]

1. Ohřev materiálu
2. Chladnutí materiálu (stárnutí)

Výhody metody[4]:

- a) Rychlý ohřev a ochlazení.
- b) Malý objem teplem ovlivněné oblasti
- c) Minimální deformace materiálu (snížení dokončujících operací)
- d) Krátký pracovní cyklus zajistí výhodnou mikrostrukturu
- e) Možnost snadné automatizace
- f) Není nutné používat ochlazovací medium (samokalící efekt)
- g) Minimální množství výparů

Nevýhody metody[4]:

- a) V důsledku krátkého pracovního cyklu je problémové zpracování slitin, které potřebují delší časový úsek pro zpracování.
- b) Vysoké pořizovací náklady metody
- c) Nutnost samokalícího efektu dané slitiny

<i>Průmyslový obor</i>	<i>Komponenta</i>	<i>Materiál</i>
Automotive	Dosedací části ložisek	AISI 1035 ocel
	Nástroj matrice	Ocel
	Části vačkového hřídele	Litina
	Nýt lamelové spojky	Ocel
	Kuželový hřídel	Ocel
	Zaoblení zalomených hřídelů	Ocel 1
	Kuželové vývrty	Litina
	Pístní kroužky	Ocel
	Pístní drážky	Litina/ocel
	Vymezovací vložka	Tvárná litina
	Drážky hřídele	AISI 1050 Ocel
	Pružinové elementy	Pružinová ocel
	Vedení ventilů	Šedá litina
	Sedlo ventilů	Ocel
	Domácí potřeby	Část psacího stroje	AISI 1065 ocel
Strojní zařízení	Řezné části	Ocel
	Vodící šroub	AISI 1045 ocel
	Funk. části ozubených kol	AISI 1060/nízkoleg. ocel
	Trn	Martenzitická ocel
	Vnitřní části potrubí	Ocel
	Upínací část nástroje	Litina
Energetika	Části lopatkových turbín	Martenzitická ocel Korozivzdorná ocel
	Železnice	Část vznětového válce	Litina

Tabulka 1. Aplikace povrchového kalení laserem v technické praxi[6]

3.3 Laserové přetavení

Oceli obsahující velké množství karbidů nebo grafitu (především nízkouhlíkové oceli) jsou obecně velice těžko zpracovatelné transformacemi v tuhém stavu. Zpracování těchto ocelí je mnohem jednodušší po jejich roztavení, jelikož difuzní rychlost uhlíku je mnohem vyšší.

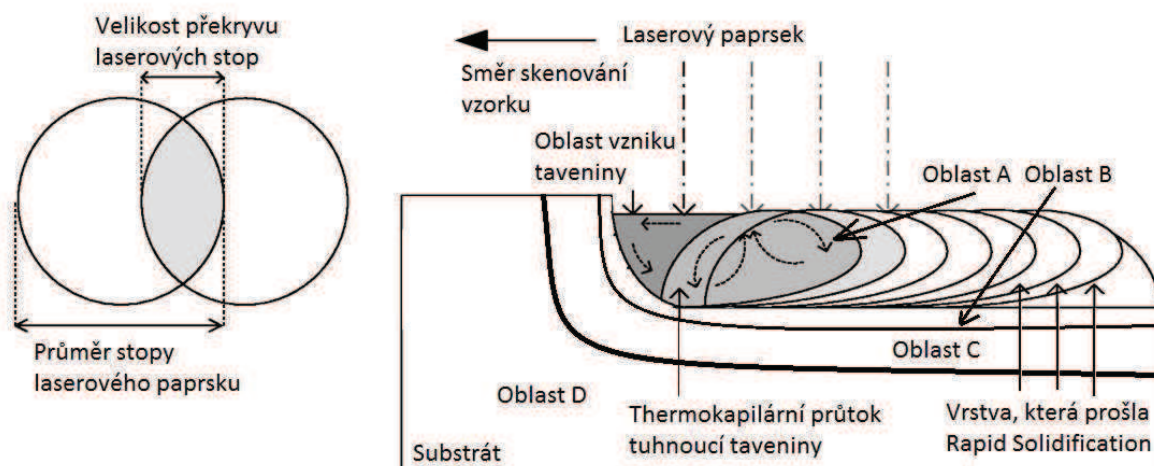
Laserové přetavení (laser surface melting nebo skin melting) je metoda, při které dochází k natavení malé vrstvičky materiálu, která následně velice rychle přechází do tuhého stavu. Tento rychlý proces vytvoření pevné fáze se nazývá rapid solidification. Výsledkem tohoto procesu je vznik mikrostruktury, která se odlišuje od svého okolí. Tato mikrostruktura vykazuje vysokou homogenitu a velikost zrna je velice malá. Tento proces je velice podobný odporovému svařování, ačkoliv se při této metodě nepřidává žádný materiál. Energie

laserového paprsku je vyšší než při povrchovém kalení, abychom dosáhli natavení malé vrstvičky materiálu. Změna mikrostruktury sebou samozřejmě nese i změnu vlastností. Ovlivňuje odolnost proti korozi, opotřebení a zvyšuje tvrdost povrchové vrstvy materiálu. Proces laser melting vede ke vzniku několika oblastí v materiálu.[4]

- A. Roztavený materiál
- B. Oblast částečně nataveného materiálu
- C. Tepelně ovlivněná zóna
- D. Základní materiál

Důsledkem procesu, který zahrnuje několikanásobné skenování povrchu, dochází ke vzniku překryvů. Je to v případě, kdy se jednotlivé skenovací trasy částečně překrývají. Tento překryv má negativní vliv na mikrotvrdost, proto je snaha snížit množství překryvů na minimum.[4]

Obecně můžeme říci, že vyšší mikrotvrdost a lepší struktury dosáhneme při vyšších rychlostech skenování a nižších energiích laserového paprsku. Ilustrace procesu laserového přetavení je na obrázku níže (Obrázek 3:3).



Obrázek 3:3. Ilustrace procesu laserového přetavení (Oblast A- roztavený materiál, Oblast B- částečně natavený materiál, Oblast C – tepelně ovlivněná zóna, Oblast D – základní materiál) [8]

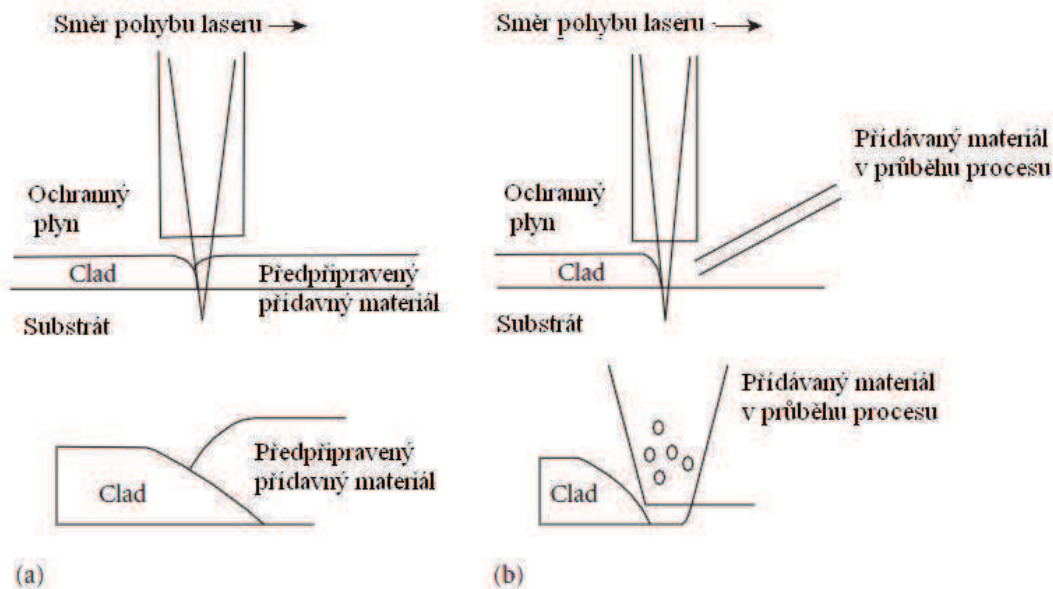
<i>Průmyslový obor</i>	<i>Komponenta</i>	<i>Materiál</i>	<i>Důvod použití</i>
Letecký	Vložka spalovacího motoru	NARloy-	Odolnost proti vzniku trhlin
Automotive	Vačkový hřídel	Litina	Odolnost proti opotřebení
	Pístní kroužek	Legovaná lit.	Zvýšení tvrdosti
Těžba	Lopatky kalového čerpadla	Šedá litina	Odolnosti proti erozi

Tabulka 2. Aplikace laserového přetavení v technické praxi[6]

3.4 Laserové navařování

3.4.1 Princip metody

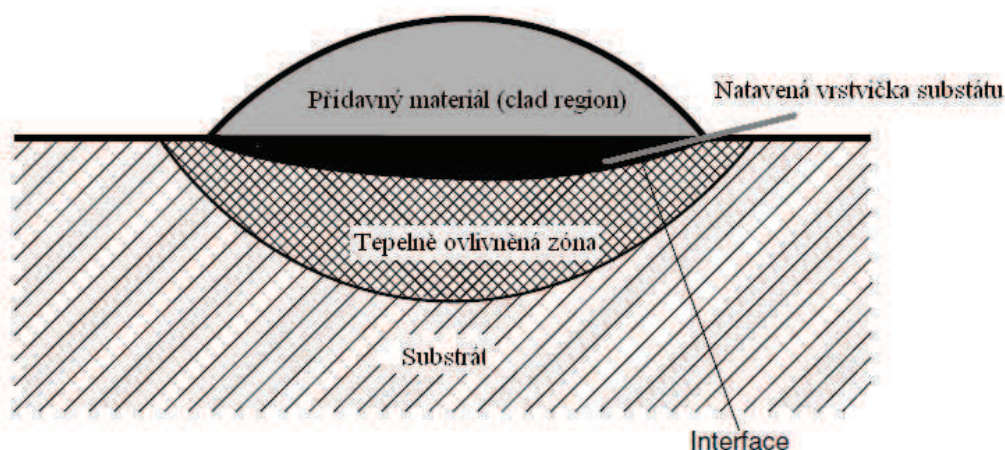
Laserové navařování (laser cladding) je jednou z metod úpravy povrchu laserem, při kterém dochází k natavení malé vrstvičky substrátu a zároveň k roztavení přídavného materiálu. Přídavný materiál může být přítomen již před zpracováním nebo je přidáván v průběhu pracovního procesu. Předpřipravený materiál může být v podobě například vrstvy získané žárovým nástřikem (HVOF, Plasma, Plamen) nebo v podobě sypké práškové směsi. V tomto případě dochází k roztavení přídavného materiálu a následuje natavení povrchové vrstvy substrátu. Tato natavená vrstvička by měla být co možná nejtenčí, aby nedošlo k přílišnému promísení substrátu a přídavného materiálu, ale současně by měla být dostatečná, aby vznikla silná metalurgická vazba. V druhém případě laserového navařování přidáváme materiál v podobě prášku do natavené vrstvičky substrátu, kde dochází k roztavení přídavného prášku a jeho následný proces ztuhnutí zvaný Rapid solidification. Tento proces tuhnutí je pozorován u obou metod, stejně jako snaha, aby přechodová vrstvička promísením byla co nejmenší. Rozdíl těchto metod je možno vidět na obrázku (Obrázek 3:4)níže.[6]



Obrázek 3:4. Ilustrace metody laser cladding (a) předpřipravený přídavný materiál a (b) materiál přidáván v průběhu procesu [6]

V důsledku velmi rychlého odvodu tepla z místa povrchu do substrátu dochází k již zmíněnému Rapid solidification. Tento proces vede ke vzniku jemné struktury bez velkého množství vad. Jelikož nedochází k přílišnému promísení substrátu a přídavného materiálu má povrchová vrstva vlastnosti dané přídavným materiálem. Proto můžeme dosáhnout povrchu, který má výrazně lepší odolnost proti korozi, opotřebení nebo zvýšenou povrchovou tvrdost. Nutné je, aby substrát měl vhodné vlastnosti a to především vhodnou tepelnou vodivost. Příkladem slitin a materiálu vhodných jako substrát jsou uhlíkové, manganové oceli, korozivzdorné oceli, slitiny na bázi hliníku, titanu, hořčíku, niklu a mědi.[6]

Na obrázku níže je (Obrázek 3:5) schéma oblastí vzniklých při laserovém navařování.



Obrázek 3:5. Schéma vzniklých oblastí materiálu při procesu laserového navařování[9]

Při tomto způsobu zpracování povrchu laserem může docházet ke vzniku trhlin. Tyto trhliny jsou způsobeny velkým tepelným pnutím. Proto, abychom se vyvarovali těmto trhlinám, musíme před vlastním zpracováním substrát předehřívát. Druhým důvodem použití předehřevu je zlepšení koheze substrátu a přídavného materiálu. Díky zvýšené teplotě dochází k lepší vazbě mezi substrátem a nataveným přídavným materiálem.[6]

3.4.2 Důležité parametry procesu

Mezi důležité parametry procesu výrazně ovlivňující výsledné vlastnosti naneseného materiálu patří[10]:

- Laserový a optický systém
 - Vlnová délka
 - Pulzní či kontinuální chod laseru
 - Tvar laserového paprsku a jeho kvalita
 - Fokusační ústrojí
- Vlastnosti zpracovávaného materiálu
 - Chemické složení a termofyzikální vlastnosti
 - Rozměry a drsnost povrchu
- Procesní parametry
 - Druh pracovní atmosféry
 - Skenovací rychlost
 - Překryv laserových stop
 - Výkon laseru

V tabulce (Tabulka 3) je uveden příklad parametrů užívaných pro laserové navařování. Není zde ovšem obsažen druh substrátu, který může také ovlivnit vlastnosti výsledného povlaku.

<i>Parametry</i>	<i>Hodnota</i>	<i>Jednotky</i>
Výkon	1–3	kW
Průměr laserového paprsku	3–5	mm
Hustota energie	1–100	kW/cm ²
Skenovací rychlost	1–60	mm/s
Rychlost přídavného materiálu	0.1–0.4	g/s
Tloušťka nanášené vrstvy	0.1–2	mm
Průměr trysky přídavného mat.	3	mm
Orientace trysky přídavného mat.	30 se substrátem	°
Ochranný plyn	Argon	–
Velikost překryvu	50	%

Tabulka 3. Příklad procesních parametrů užívaných pro laserové navařování[4]

3.4.3 Slitiny přídavného materiálu a substrátu

Substrát

Součásti vyrobené mangano-uhlíkových ocelí, korozivzdorných a nástrojových jsou často používané pro laserové navařování. Dalšími rozšířenými materiály pro substrát jsou slitiny na bázi uhlíku, magnesia, oceli pro lití a niklové superslitiny. Materiál substrátu musí mít dostatečnou tepelnou kapacitu, aby odvedl teplo z místa povrchu do těla součásti. Nesmí docházet k přílišnému promísení prvků substrátu a přídavného materiálu, aby nedocházelo k vzniku křehkých fází. Rozměry součásti předurčují nutné úpravy a počet nutných přejezdů laserovou hlavicí, aby došlo ke vzniku souvislé vrstvy. Problematické jsou ostré hrany a rohy, kde dochází ke vzniku chyb. Povrch musí být před prováděnou operací vhodně očištěn, odmaštěn a mořen, pokud by tomu tak nebylo, případná kontaminace by způsobila vznik nekvalitní vrstvy.[6]

Typy slitin přídavného materiálu

Vhodné slitiny mohou být charakterizovány požadovanými vlastnostmi. Musí být schopny efektivně absorbovat laserové vlnění o dané vlnové délce, aby došlo ke vzniku taveniny. Zároveň nesmí docházet k přílišnému odpaření daného materiálu, což by vedlo k zhoršení účinnosti, jelikož by docházelo k velké reflexi laserového záření. Složení slitiny musí být takové, aby došlo ke vzniku slitiny se substrátem a tím se vytvořila dostatečná metalurgická vazba. Je však nutno se vyvarovat vzniku křehkých fází na přechodu mezi substrátem a přídavnou vrstvou (interface). Laserové navařování je vhodné pro kombinaci kovových slitin, které jsou nanášeny na jinou kovovou slitinu. Problém nastává, pokud je záměrem zkombinovat materiály se zcela odlišnými vlastnostmi. Jako příklad nevhodnosti metody je nanášení kovových slitin na keramické materiály. Přídavné materiály musí mít dostatečnou tepelnou vodivost, aby dokázaly přenést teplo do substrátu. Pokud by tomu tak nebylo, došlo by ke vzniku trhliny ve vrstvě.

Nejpoužívanější přídavné materiály, které zpevňují povrch substrátu, můžeme rozdělit do čtyř kategorií. Kobaltové slitiny, slitiny na bázi železa, niklové slitiny a karbidy wolframu, titanu a křemíku. Pro speciální účely můžeme použít i slitiny lehkých kovů jako například slitiny hliníku.[6]

3.4.4 Aplikace metody

Tabulka aplikací (Tabulka 4) ilustruje použití laserového navařování v průmyslových oborech. Tradičně používané lasery CO_2 a Nd:YAG, které byly využívány jak v pulzním tak v kontinuálním módu, začínají být nahrazovány diodovými zdroji. Kobaltové slitiny na bázi Stellitu jsou velice rozšířenou aplikací laserového navařování v průmyslové praxi. Především pro aplikace, kde pracovní teplota je do 500°C. Další možností je nanesení niklových superslitin na mnohem levnější materiál substrátu. Metoda laserového navařování byla původně vyvinuta jako samostatná metoda povrchové úpravy především letectví a kosmonautice, nyní se však rozšířila i do mnoha jiných odvětví. Je dokonce používána i jako metoda opravy drahých součástí. Díky snížení finanční náročnosti zdrojů laserového záření a zvýšení jejich výkonu je možné nyní nanášet vrstvy na větší součásti a zároveň vyšší vrstvy přídavného materiálu.[6]

<i>Průmyslový obor</i>	<i>Komponenta</i>	<i>Materiál nanášený laser claddingem</i>
Automotive	Sedla ventilů	Bronz
	Sedla ventilů	Ni–Cr–B–Si, Co–Cr–W
	Kraj ventilů	Stellite
	Vstřikovací nástroje	P20 nástrojová ocel
Letectví	Lopatky turbín	Stellite
	Lopatky turbín	Niklové slitiny
	Lopatky kompresorů	Ni–Cr
Obrábění	Obráběcí nože	Stellite 6
	Listy mlecích nástrojů	Stellite
	Modifikace nástrojů	P20 nástrojová ocel
	Obráběcí nástroje	Železné slitiny
	Pouzdra čerpadel	Slitina-WC
	Pohybový šroub	Al bronz
	Nástroje pro hluboké tažení	Stellite SF6
Petrochemický	Vrtací tyče	Stellite, Colmonoy
	Válce	Stellite 6
Energetika	Části lopatkových turbín	Inconel 718
	Lopatky turbín	Kobaltové slitiny
	Lopatky turbín	Stellite

Tabulka 4. Aplikace laserového navařování v technické praxi[6]

3.4.5 Klady a zápory metody

Výhody metody laserového navařování oproti tradičním metodám[4]:

1. Malé množství vnesené tepelné energie, které vede k malé tepelně ovlivněné zóně. Díky tomuto nedochází k výrazným deformacím součásti a není nutné dodatečné obrábění.
2. Dosažení velice kvalitního depozitu s minimem chyb a minimální porózností.
3. Při této metodě je velmi malá ztráta přídavného materiálu vlivem odpaření.
4. Možnost nanesení vrstvy na velice malou část povrchu.

5. Minimální zředění přídavného materiálu materiálem substrátu (méně než 2%), tudíž je zajištěno požadovaných vlastností vrstvy.
6. Flexibilita a lehká automatizace
7. Vznik metalurgické vazby k substrátu, což vede k povlaku o vysoké integritě.

Jako každá metoda má i metoda laserového navařování několik nevýhod a omezení, které musí být respektovány[4]:

1. Tato metoda není vhodná pro použití, pokud je oblast zvýšení tvrdosti relativně malá.
2. Laser cladding je ve srovnání s běžnými procesy vytváření povrchové vrstvy dražší
3. Vysoké pořizovací náklady.

4 Žárové nástřiky

4.1 Úvod do problematiky

V praxi se setkáváme s požadavky na zvýšení životnosti a spolehlivosti exponovaných součástí strojních zařízení, jejichž povrch nebo část povrchu je namáhána a degradována různými mechanizmy opotřebení vycházejícími z daných pracovních podmínek zařízení nebo součástí.

Ve většině případů již dnes nedostačují dosavadní klasické technologie a technologické postupy a proto se sahá k jiným technologiím. Jednou z vhodných možností řešení je aplikace progresivní technologie žárového nástřiku.

Žárový nástřik je částicový proces vytváření povlaků o tloušťce obvykle větší než 50 μm , kdy je nanášený materiál ve formě prášku (případně drátu) přiváděn do zařízení, kde dojde k jeho natavení. V důsledku kinetické síly materiálu či rychlosti média dochází k urychlení směrem k povlakované součásti. Po dopadu na substrát dojde k výraznému plošnému rozprostření částice a k jejímu rychlému přechodu do tuhého stavu. Tím se vytváří povlak s charakteristickou lamelární strukturou a specifickými vlastnostmi.

Technologie žárových nástřiků umožňuje vytvářet povlaky z těch druhů keramik, kovů a jejich slitin, u kterých nedochází k rozpadu pod bodem tání, na prakticky všechny typy materiálů substrátu. Technologický proces zaručuje teploty povlakované součásti hluboko pod teplotou fázově-strukturních přeměn (cca 80 až 120 $^{\circ}\text{C}$), což brání nežádoucím deformacím součásti.

Struktura povlaku je tvořena jednotlivými deformovanými částicemi. Míra porózy, stejně jako kvalita zakotvení povlaku k povrchu substrátu a výskyt nenatavených či zoxidovaných částic jsou závislé na teplotě a rychlosti dopadajících částic. Teplota a rychlost částic jsou nejdůležitějšími parametry procesu žárového nástřiku, přímo ovlivňujícími kvalitu výsledného povlaku. Jednotlivé technologie žárového nástřiku dosahují v závislosti na použitém zdroji tepelné energie, konstrukci a nastavení procesních parametrů různých hodnot teploty a rychlosti částic. V případě technologie HVOF (vysokorychlostní nástřik plamenem) je díky unikátní konstrukci hořáku dosahováno vysokých rychlostí letících částic za relativně nízkých teplot (v porovnání např. s plazmatickým nástřikem). To umožňuje vytvářet husté povlaky s nízkou mírou dekompozice povlaku během nástřiku a velmi vysokou adhezí k základnímu materiálu.[11]

Technologií žárového nástřiku mohou být připravovány povlaky z různých typů materiálů s rozsahem vlastností vhodných jak pro aplikaci v plynových turbínách, tak např. v elektronickém průmyslu. Velkou skupinou povlaků jsou povlaky určené jako ochrana proti opotřebení, často v kombinaci s odolností proti vysokým teplotám nebo koroznímu napadení.[11]

Tradiční aplikace žárově stříkaných povlaků se zaměřují především na ochranu povrchů. V současné době se ale objevují aplikace používající povlaky jako funkční povrchy nabízející materiálovým inženýrům alternativu mezi používáním tenkých vrstev a objemových materiálů.

V řadě případů - energetika, automobilový průmysl, letecký průmysl, chemický a petrochemický průmysl, lékařství - jsou technologie žárově stříkaných povlaků nezastupitelné a sehrávají klíčovou roli při výrobě. Jejich praktický dopad na kvalitu výrobků spočívá v technickém a ekonomickém zvyšování užitečných vlastností jak v prvovýrobě, tak i v oblasti renovací. [12]

Zdrojem tepelné energie, nutné k nastavení přídavného materiálu, může být buď spalovací proces, nebo elektrická energie. Podle konstrukce zařízení a použitého zdroje energie lze rozlišit základní druhy žárového nástřiku: nástřik plamenem, plazmatický nástřik a nástřik elektrickým obloukem. (viz Obrázek 4:1)[12]

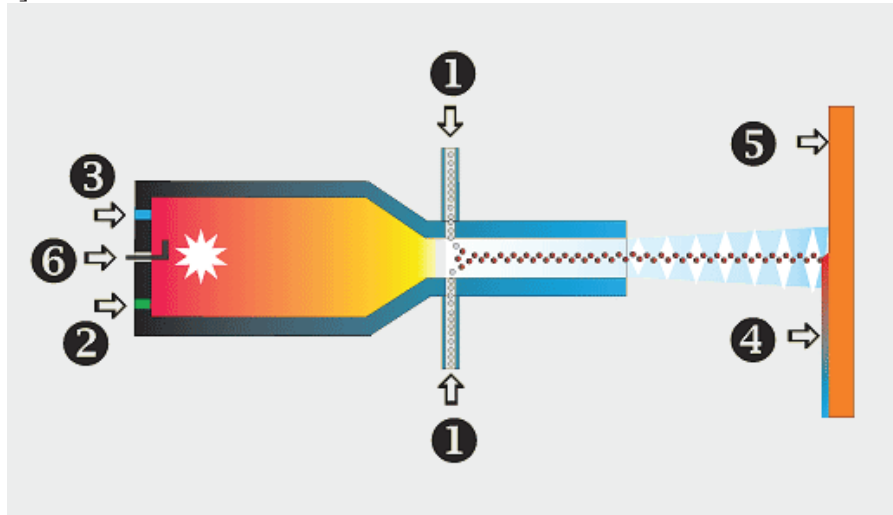
Technologie	Forma materiálu	Teplota plamene [°C]	Rychlost částic [m/s]	Typické materiály	Vlastnosti povlaku	Vhodné aplikace
HVOF	prášek	~ 3000	~ 400-1000	kovy, slitiny, cermety	velká hustota, výborná adheze, tlakové pnutí	ochrana proti opotřebení, korozi
Plasma	prášek	~ 5000 - 25 000	~ 80-300	keramika	porézní v případě keramik	tepelné bariéry, izolátory
El. oblouk	drát	~ 3000 - 6000	~50-150	kovy, slitiny, cermety (trub. dráty)	větší tloušťka, vysoká hustota	otěruvzdorné povlaky, renovace
Plamen	prášek/drát	~2700 - 3000	~80-100	kovy, slitiny, plasty	vyšší porezita a obsah oxidů	klasická metalizace, méně náročné aplikace

Obrázek 4:1. Parametry žárových nástřiků a jejich vlastnosti[12]

4.2 HVOF metoda

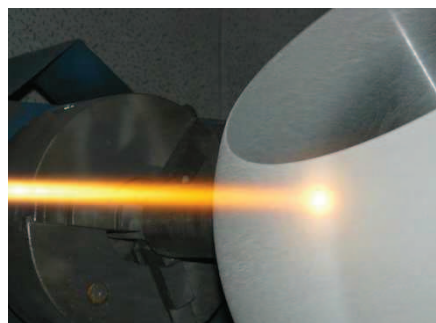
4.2.1 Princip metody HVOF

V případě HVOF (High Velocity Oxygen Fuel) je zdrojem tepelné energie směs kyslíku a kerosinu. Kyslík a kerosin jsou axiálně napouštěny do spalovací komory, kde dojde k jejich atomizaci, a zažehnutí jiskrou zapalovací svíčky (viz Obrázek 4:2). Produkty spalování jsou pak urychleny v konvergentně divergentní trysce až na supersonické hodnoty (Mach 1-2). Tlak ve spalovací komoře je monitorován, aby se zabezpečily stabilní podmínky hoření a reprodukovatelnost procesu. Hořák je ochlazován vodou, která proudí v meziplášti hořáku.[12]



Obrázek 4:2. Schéma vysokorychlostního nástřiku HVOF (1. Přídavný materiál – prášek, 2. Přívod kerosinu, 3. Přívod kyslíku, 4. Nástřik, 5. Podklad, 6. Zapalovací svíčka)[13]

Spaliny jsou urychlovány v trysce až na nadzvukové hodnoty výstupní rychlosti. Materiál ve formě prášku je za pomoci nosného plynu dusíku přiváděn radiálně z protilehlých stran do tzv. difuzoru, kde dojde k jeho natavení a přes trysku pak k výraznému urychlení směrem k povlakované součásti. Termodynamické děje probíhající v proudu spalin proudících nadzvukovou rychlostí, vedou ke vzniku expanzních a kompresních vln, tzv. šokových diamantů, které jsou viditelné v plameni vycházejícím z hořáku. [12] Na obrázku níže (Obrázek 4:3) je zachyceno nanášení HVOF nástřiku.



Obrázek 4:3. Vysokorychlostní nástřik HVOF [13]

Vysoká rychlost částic prášku při dopadu způsobí rovnoměrné rozprostření a zakotvení částic k podkladovému materiálu a tím vzniká vysoká hustota a přilnavost HVOF stříkaných povlaků. Relativně nízká teplota plamene cca 3000 °C omezuje tuto technologii pro nástřik keramických povlaků, na druhou stranu výrazně omezuje oxidaci, fázové přeměny a vyhořívání některých prvků nanášeného materiálu v průběhu nástřiku. Unikátní vlastností této technologie je, že poskytuje na rozdíl od všech ostatních metod žárových nástřiků povlaky v tlakovém pnutí. Tlakové pnutí v povlaku podstatně zvyšuje přilnavost nástřiku k podkladu (soudržnost cca 70MPa) a je rovněž příznivé z hlediska únavových vlastností povlakovaných součástí. [13]

Na rozdíl od ostatních technologií vytváření povlaků, není žárový nástřik metodou HVOF založen na depozici jednotlivých atomů či iontů. Na povrch dopadají celé natavené (nebo částečně natavené) kapky materiálu, které ulpívají pouze na površích ležících v dráze letících kapek. Ve srovnání s PVD či CVD metodami depozice má žárový nástřik vysokou depoziční rychlost a široký rozsah přídavných materiálů. [12]

4.2.2 Aplikace metody HVOF

Obecné

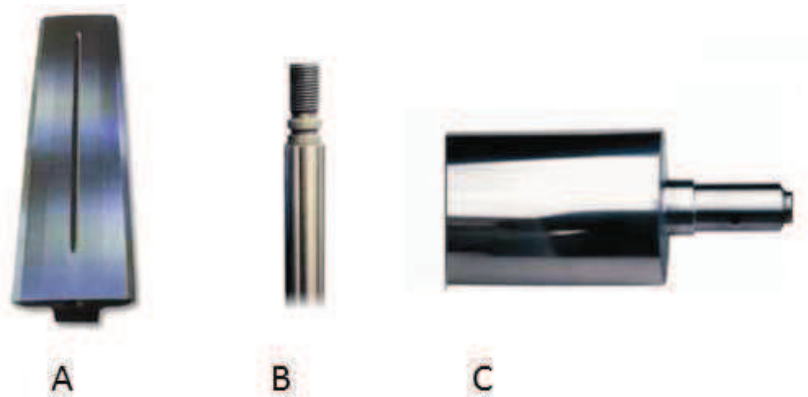
Teplota plamene předurčuje tuto technologii k nástřiku kovů a jejich slitin s nízkou a střední teplotou tavení. Typickými materiály pro HVOF nástřik jsou cermety, nejčastěji na bázi karbidů wolframu, chromu a titanu. Typickými aplikacemi jsou povlaky odolné proti opotřebení a korozi v různých prostředích.

Charakter a vlastnosti povlaků[12]:

- Hustota: > 95%
- Adheze: 70 MPa
- Obsah oxidů: nízký až střední

HVOF povlaky jsou svojí strukturou a vlastnostmi porovnatelné s povlaky vytvořenými pomocí technologie D-Gun. Jejich hustota, adheze k základnímu materiálu i obsah oxidů ve struktuře v mnoha případech převyšuje kvalitu povlaků vytvořených pomocí plazmatického nástřiku. HVOF povlaky dosahují v některých případech adhezni pevnosti více jak 83 MPa, hustota povlaků je uváděna až 98 % hustoty objemového materiálu. Analýzou HVOF nástřiků WC/Co povlaků bylo prokázáno, že díky ve srovnání s plazmatickým nástřikem nižší teplotě procesu nedochází k rozpadu WC fázi a tím zůstávají zachovány původní vlastnosti materiálu (zejména tvrdost).[12]

Obrázek níže (Obrázek 4:4) ukazuje příklady použití HVOF metody.



Obrázek 4:4. Příklady použití HVOF technologie (A- Napínací stolík pásové brusky-povlak WC Co, B – dřík pístu ventilu-WCCrC NiCo, C- polygrafická válec – Cr_3C_2 [14]

Úspěšná aplikace žárově stříkaných povlaků na bázi plastů, kovů, slitin, oxidických a neoxidických keramik a cermetů obecně zvyšuje provozní spolehlivost povlakovaných dílců a komponent, umožňuje jejich funkci ve zcela specifických podmínkách provozu, přináší velké finanční úspory a je základem pro nová nekonvenční technická řešení a široké aplikační využití ve sféře průmyslové praxe. Pro základní orientaci je možné uvést některé z možných aplikací v různých odvětvích[12]:

- a) Energetika
- b) Všeobecné strojírenství
- c) Automobilový průmysl
- d) Letecký průmysl
- e) Těžké strojírenství
- f) Sklářský průmysl
- g) Renovace
- h) Medicína

4.2.3 Klady a zápory

Klady HVOF stříkaných povlaků [12, 15]:

- možnost materiálové volby
- jemná povrchová struktura nástřiku
- široký výběr materiálu prášků
- vynikající zakotvení do základního materiálu (60-100MPa)
- tlakové napětí v nástřikové vrstvě
- nízká teplota podkladu do 150°C
- nízká pórovitost (obvykle < 1%) a obsah oxidů
- vysoká soudržnost a strukturní stabilita
- rychlost depozice
- v podstatě neomezená velikost součástí
- rovnoměrná tloušťka povlaku

- tloušťky povlaků na bázi kovů, ocelí, superslitin a cermetů mohou být 0,1-několik mm
- vysoká tvrdost (až HRC 55-68) a mikrotvrdost (až HV0,1- 1700-1800)
- pevnost se blíží hodnotám pevnosti materiálů připravovaných technologiemi práškové či klasické metalurgie
- nezávislost na základním materiálu díky mechanickému zakotvení stříkaných povlaků
- ekologicky přijatelné - odpad ve formě prostříku může být recyklován nebo jinak použit
- vysoká dosažitelná jakost povrchu

Uvedené vlastnosti mají přímou souvislost s vysokou odolností těchto materiálů v nejnáročnějších podmínkách jak z hlediska opotřebení mechanického tak i korozního. Vytváření povlaků s tlakovým pnutím je v této oblasti zcela unikátní, protože nejenže umožňuje vytvářet povlaky větších tloušťek, ale je příznivé i s ohledem na únavové vlastnosti povlakovaných součástí.[15]

Zápory HVOF stříkaných povlaků[12]:

- hlučnost metody až 130 dB
- nelze nanášet keramické povlaky
- omezení pro nástřik vnitřních ploch
- mechanické zakotvení
- pouze pro kovy s nižší a střední teplotou tavení
- určité množství oxidů a pórovitosti, které může způsobit korozi a snížit odolnost proti opotřebení

4.3 Metody post-treatmentu

Žárové nástřiky jsou velice často doplněny následnými úpravami vzniklé vrstvy. Cílem těchto procesů je zajistit rozměrovou přesnost, zlepšit nebo změnit mikrostrukturu nástřiku. Aplikací metod post-treatmentu lze odstranit některé nevýhody spojené s žárovými nástřiky.

Zlepšení vlastností v důsledku post-treatmentu[16]:

- Změna mikrostruktury
- Zvýšení vazebné síly substrátu
- Snížení zbytkového vnitřního napětí
- Snížení porózy
- Snížení obsahu oxidů
- Precipitace tvrdých fází
- Chemická modifikace

Metody, které zlepšují výše zmíněné vlastnosti, můžeme rozdělit dle několika kritérií například dle fyzikálních či chemických postupů. Níže je uvedeno obvyklé dělení metod post – treatmentu.[16]

- Mechanické zpracování zahrnující: obrábění, broušení, leštění, shot peening, HIP (Hot isostatic pressing)
- Fyzikální – chemické zpracování například: organické těsnění, chromování, aluminace
- Tepelná modifikace povrchu: tavení, tepelné zpracování, rekrytalizace, laserové přetavení, HIP

Mezi nejčastější úpravy povrchu řadíme především mechanické zpracování. Jedná se o dokončující operace leštění, broušení a také obrábění. Vhodný výběr je na základě potřebné rozměrové a tvarové přesnosti, tvrdosti a drsnosti.

Do této kategorie může být také zařazena dokončující operaci zvaná shot peening. Při tomto zpracování dochází k plastické deformaci nástřiku v důsledku bombardování tvrdých globulárních částic. Při shot peeningu dochází ke zvýšení povrchového tlakového napětí, které zvyšuje únavovou pevnost materiálu. Také dochází ke snížení porózy nástřiku.

Většina žárových nástřiků bývá porézních. V důsledku této porózy dochází k penetraci a vyplnění pórů kapalinami či plyny, které mohou vést k degradaci vlastností v důsledku vzniku koroze. Možností jak zabránit vnikání nežádoucích penetrantů, může být vyplnění pórů vhodně zvolenými organickými látkami. Tento způsob se nazývá organické těsnění. Dochází při něm k vyplnění pórů zvolenou organickou látkou, která tvoří efektivní bariéru proti penetraci nechtěných látek a může také zajišťovat i jiné funkce:

- Zablokování částic z broušení uvnitř žárového nástřiku
- Zvýšení mezičásticové soudržnosti
- Zajištění speciálních vlastností povrchů jako je například nepřilnavost

Základními a nejdůležitějšími vlastnostmi organických těsnících látek je viskozita a odolnost proti korozi za pracovních teplot po vytvrzení. Několik příkladů organických látek používaných při této aplikaci jsou v tabulce níže (Tabulka 5).[16]

<i>Organický materiál</i>	<i>Charakteristika</i>
Barvy	Na bázi vody a vodou ředitelné
Vosky	Nízká teplota tavení
Fenoly	Přírozně vytvrzené nebo za zvýšené teploty
Epoxidové fenoly	Přírozně vytvrzené nebo za zvýšené teploty
Epoxidové pryskyřice	Vytvrzené pomocí katalyzátoru
Polyester	Přírozně vytvrzené nebo za zvýšené teploty (katalyzátorem)
Silikony	Vytvrzení za zvýšené teploty
Polyuretany	Přírozně vytvrzené nebo za pomoci katalyzátoru
Lněné oleje	Přírozně vytvrzené
Polyamidy	Vytvrzení za zvýšené teploty
Uhelné dehty	Přírozně vytvrzené
Anaerobika	Vytvrzené bez přístupu kyslíku

Tabulka 5. Běžně používané organické těsnící látky včetně jejich charakteristiky[16]

Aplikace těsnění může být zajištěna několika způsoby například: broušením, nástřikem nebo máčením. Metoda aplikace je závislá na vlastnostech těsnící látky, velikosti nanášeného povlaku a vytvrzování.

4.3.1 Tepelná modifikace povrchu

Tepelná modifikace povrchu zároveň stříkaných vrstev zahrnuje rozmanité způsoby jak ovlivnit vlastnosti této vrstvy. Existují i modifikace povrchu, při kterých je povrch vystaven nejen zdroji tepla, ale i tlaku (HIP). Důvod použití těchto metod je obdobný předcházejícím případům, tedy zlepšit nevyhovující vlastnosti. Je možné snížit množství oxidů, porózity, zlepšit homogenitu vrstvy, mikrostruktury, zvýšit chemickou vazbu mezi substrátem a nástřikem atd. Tyto metody lze rozdělit na metody bez natavení povrchu a metody s natavením povrchu. [16]

Hot Isostatic Pressing

Jedná se o metodu tepelné modifikace povrchu, při které je nástřik vystaven současně vysoké teplotě a vysokému tlaku kolem 10MPa. Teplota je typicky nižší než je teplota solidu tedy pro ocel 1100°C a pro niklové a kobaltové slitiny cca 975°C. Působení tlaku zvyšuje hustotu nástřiku, zlepšuje mechanické vlastnosti a snižuje množství pórů. Zvýšená teplota urychluje difúzní pochody v nástřiku a na rozhraní substrátu a nástřiku, zlepšuje vazebnou pevnost. Toto kombinované zatížení nástřiku vede ke zvýšení odolnosti proti únavě a zvýšení odolnosti proti opotřebení. Hot isostatic pressing je běžně používáno pro výrobu v práškové metalurgii.[16]

Tepelné zpracování žárových nástřiků

Tepelné zpracování je metoda modifikace povrchu, která se odehrává při zvýšené teplotě, ovšem teplota nepřekročí teplotu tavení. Na rozdíl od procesů tavení nedochází ke vzniku taveniny a oproti HIP, je povrch vystaven atmosférickému tlaku nebo podtlaku. Důvody použití tepelného zpracování žárového nástřiku[16]:

- Difúze mezi substrátem a žárovým nástřikem zvyšuje pevnost mezivrstvy. Difúze atomů je zajištěna zvýšenou teplotou, která je ovšem nižší než je teplota solidu. Tento jev je také spojen s vznikem metalurgické vazby a zvýšení pevnosti.

- Zbytkové napětí je sníženo a koheze mezi částicemi žárového nástřiku se zvýší podobně jako při žíhání pouze výrazněji. Tvrdost žárového nástřiku může být snížena, zvýšena houževnatost, odolnost proti rázům se může zvýšit a modul elasticity taktéž může vzrůst.
- Difúzní pochody také mohou snížit množství pórů v nástřiku. Tento jev ovšem časově závislý a pravděpodobně velice pomalý pro praktické užití.
- Během tepelného zpracování může dojít ke strukturním a fázovým přeměnám. Množství oxidů je redukováno, pokud je ohřev prováděn v atmosféře vodíku nebo ve vakuu. Podobně může dojít k precipitaci karbidů a nitridů.

Druhy metod tepelného zpracování[16]:

- V pecní atmosféře za přítomnosti vzduchu nebo inertního prostředí
- Vakuové nebo nízkotlakové pece využívající inertní plyn
- Indukční ohřev
- Procesy využívající laser

Tavení (melting)

K natavení a vzniku homogenního nástřiku dochází při teplotách, které jsou silně závislé na druhu materiálu žárového nástřiku. Obecně při teplotách nad teplotou solidu daného materiálu. Substrát i žárový nástřik je většinou taven pomocí hořáku či v peci. Můžeme také využít indukční ohřev nebo laser. Samotavitelné materiály na bázi kobaltu nebo niklu jsou často naneseny pomocí plamene nebo HVOF metody. Tyto samotavitelné slitiny obsahují prvky, které reagují s kyslíkem za vzniku oxidů. Tyto oxidy mají nízkou hustotu, proto dochází k jejich pohybu na povrch nástřiku a tím zvýšení hustoty a snížení množství oxidů uvnitř žárového nástřiku. Obecně se jedná o slitiny na bázi niklu a kobaltu obsahující bor nebo křemík. Tyto prvky mohou být legovány samostatně nebo v kombinaci, jejich množství však musí být takové, aby přesýtili danou slitinu o 1,5%. Chrom je přidáván do mnoha slitin pro zvýšení odolnosti proti opotřebení a korozi.[16]

Žárové nástřiky, které byly vystaveny tavení, mají tyto vlastnosti:

- Téměř 100% hustota, nepropustný, dochází k vytvoření metalurgické vazby mezi nástřikem a substrátem
- Široký rozsah tvrdostí od 20 do 70 HRC (závisí na množství boru a uhlíku)
- Obsahují struskové vměstky při nástřiku plamenem nebo HVOF metodou. (Množství struskových vměstků je nižší, pokud je užito plazmového nástřiku)
- Velice dobrá odolnost proti rázům, což je zapříčiněno velice vysokou integritou žárového nástřiku.
- Vysoká odolnost proti korozi a žárutvrdost dovolující použití při teplotách přesahujících 650°C.
- Smrštění nástřiku 10% až 20% po tavení díky snížení množství pórů.
- Velice jemný povrch nástřiku.

V následující tabulce (Tabulka 6) je vypsáno několik slitin žárových nástřiků vhodných pro modifikaci tavením.

<i>Slitina</i>	<i>Nominální složení wt%</i>							
	Ni	Co	Cr	C	Si	B	Fe	W
Deloro Alloy 40	bal	...	7.5	0.35	3.5	1.7	1.5	...
Deloro Alloy 50	bal	...	11.0	0.45	4.0	2.4	3.0	...
Deloro Alloy 60	bal	...	15.5	0.8	4.3	3.5	4.0	...
Stellite SF6	13	bal	19	0.7	2.3	1.7	3.0	7.5
Stellite Alloy 15	2 max	bal	22	0.1	1.6	2.4	2 max	4.5

Tabulka 6. Příklad slitin žárových nástřiků vhodných pro modifikaci tavením[16]

5 Kobalt

5.1 Základní popis prvku a jeho výskyt

Kobalt je houževnatý, stříbrně šedý magnetický kov, který je podobný železu a niklu. Podobá se jim vzhledem, tak i vlastnostmi. V periodické tabulce prvků se právě mezi těmito dvěma kovy vyskytuje, což vysvětluje podobnosti.[17]

Kobalt můžeme řadit mezi strategické suroviny, jelikož je v hojné míře využíván v průmyslové výrobě a také je součástí mnoha použití v armádním průmyslu.

Tento prvek řadíme mezi alotropické kovy, což znamená, že v pevném stavu se vyskytuje v několika krystalografických uspořádáních. Pod teplotou 417°C se kobalt vyskytuje v uspořádání hexagonálním s těsným uspořádáním atomů (ϵ - kobalt). Mezi teplotami 417°C a 1493°C má tento prvek mřížku kubickou plošně centrovanou (α -kobalt). Teplota 1493°C je teplotou tavení čistého kobaltu.[17]

Kobalt je v přírodě rozšířeným prvkem, ale je v rozptýlené formě. Stopy mohou být detekovány v rostlinách či manganových podmořských depositech. V přírodě nejsou známa naleziště rud s převažujícím množstvím kobaltu. Ten vždy pouze doprovází niklové rudy a nalezneme jej i jako doprovodný prvek v sulfidických rudách mědi. V dnešní době je kobalt získáván derivací z niklových, měděných a měď-niklových rud. Největší zásoby rud s významným podílem kobaltu jsou v Zambii, Rusku, Číně, Finsku, Austrálii, Demokratické republice Kongo a Kanadě. V tabulce níže (Tabulka 7) jsou uvedeny statistiky těžby a zpracování kobaltu v roce 2012, které byly zaznamenány Cobalt Development Institute.

Země	Těžba	Zpracování	Odhadované zpracované množství
<i>Austrálie</i>	×	×	4,8
<i>Botswana</i>	×		
<i>Brazílie</i>	×	×	1,75
<i>Belgie</i>		×	4,2
<i>Kanada</i>	×	×	5,6
<i>Čína</i>	×	×	30
<i>Kuba</i>	×		Viz. Kanada
<i>Francie</i>		×	320
<i>Finsko</i>		×	10,5
<i>Indie</i>		×	600
<i>Japonsko</i>		×	2,5
<i>Maroko</i>	×	×	1,3
<i>Nová Kaledonie</i>	×		
<i>Norsko</i>		×	3
<i>Rusko</i>	×	×	2,1
<i>Jižní Afrika</i>	×	×	1,1
<i>Uganda</i>	x	x	550
<i>Demokratická republika Kongo</i>	×	×	3,25
<i>Zambie</i>	×	×	5,4
Total			~77,000(tun)

Tabulka 7. Statistika těžby a zpracování kobaltu v roce 2012[18]

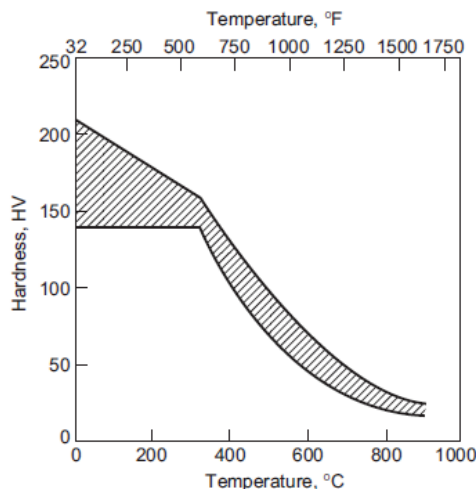
5.2 Fyzikální a chemické vlastnosti

Kobalt s atomovým číslem 27 je v periodické tabulce prvků, jak již bylo zmíněno výše, mezi železem a niklem. Hustota kobaltu je 8850 kg/m^3 , což je velice podobné hustotě mědi, která je 8902 kg/m^3 . Jedná se o feromagnetický prvek, který má při běžné pokojové teplotě v původním stavu permeabilitu 68 a maximální permeabilita, kterou je schopen dosáhnout je 245. Teplota změny magnetického chování, tedy Currieho teplota, je 1121°C , což je znatelně vyšší oproti železu (770°C) nebo mědi (358°C). Důležité vlastnosti jsou zahrnuty v tabulce (Tabulka 8).

Vlastnost	Hodnota
<i>Hustota</i>	8.85 g/cm^3
<i>Teplota tavení</i>	1493°C (2719°F)
<i>Teplota vypaření</i>	3100°C (5612°F)
<i>Koeficient lineární teplotní roztažnosti</i>	10^{-6} per $^\circ\text{C} = 12.5$ (to 100°C)
<i>Koeficient objemové teplotní roztažnosti</i>	10^{-6} per $^\circ\text{C} = 35.6$ (to 100°C)
<i>Přechodová teplota mezi hexagonální a kubickou mřížkou</i>	$\sim 421^\circ\text{C}$
<i>Curieho teplota</i>	1121°C
<i>Atomové číslo</i>	27
<i>Měrné teplo</i>	$0.414 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$ (při pokojové teplotě)
<i>Tepelná vodivost</i>	$69.04 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ (při pokojové teplotě)
<i>Měrný elektrický odpor</i>	$0,097 \text{ n}\Omega \cdot \text{m}$

Tabulka 8. Fyzikální konstanty čistého kobaltu [17],[18]

Tvrdość kobaltu za pokojové teploty se dle zdrojů [17] pohybuje mezi hodnotami 140 až 250 HV. U dobře vyžehnaného a vysoce čistého kovu se rozptýl této hodnoty výrazně sníží na 140÷160HV. Závislost tvrdosti na teplotě je zaznamenána na obrázku níže (Obrázek 5:1).



Obrázek 5:1. Závislost tvrdosti kobaltu na teplotě [19]

Youngův modul pružnosti v tahu je 211 GPa, ve smyku je 82 GPa a pro modul v tlaku je ta tato hodnota 183GPa.

Mechanické vlastnosti kobaltu o vysoké čistotě 99,5%, který byl zpracován pomocí vakuového tavení, které bylo následně doplněno zpracováním za tepla a žháním mezi teplotami 800-1000°C, jsou zaznamenány v tabulce (Tabulka 9). Nutno však poznamenat, že zpracování za běžné atmosféry by snížilo tvárnost.

Vlastnost	Hodnota
Mez pevnosti R_m	800 ÷ 875MPa
Mez kluzu $Re_{0,2}$	305 ÷ 345MPa
Prodloužení A	15 ÷ 30%

Tabulka 9. Mechanické vlastnosti vysoce čistého kobaltu za daného zpracování[17]

5.3 Použití

Použití kobaltu je velice široké především ve formě slitin na bázi kobaltu. Tyto slitiny můžeme rozdělit na slitiny kobaltu s vysokou odolností proti opotřebení, slitiny kobaltu pracující za vysokých teplot, slitiny kobaltu s vysokou odolností proti korozi. Dále je kobalt důležitou součástí nástrojových rychlořezných ocelí, slinutých karbidů a niklových slitin.

Některé kobaltové slitiny vykazují biokompatibilitu, což je předurčuje pro použití ortopedické implantáty.

Využití sloučenin kobaltu můžeme hledat i mimo metalurgické aplikace. Například katalyzátory pro zpracování ropy a v chemickém průmyslu. Součásti barev a laků. V neposlední řadě můžeme využití kobaltu hledat v průmyslu zabývajícím se výrobou baterií a magnetické nahrávací zařízení.[17]

Shrnutí využití kobaltu jeho slitin a sloučenin:

Metalurgické

- Kobaltové slitiny
- Niklové superslitiny
- Slinuté karbidy
- Rychlořezné nástrojové oceli

Nemetalurgické

- Malířské pigmenty
- Magnetické materiály
- Uměle zdroje rentgenového γ záření

5.4 Kobaltové slitiny

Jak již bylo zmíněno výše, slitiny na bázi kobaltu můžeme rozdělit [17]:

- Slitiny kobaltu s vysokou odolností proti opotřebením
- Slitiny kobaltu pracující za vysokých teplot
- Slitiny kobaltu s vysokou odolností proti korozi

Většina vlastností slitin vychází z krystalografické struktury kobaltu. Především schopnost reagovat na zatížení. Přidáním legujících prvků chromu, wolframu a molybdenu dochází ke zpevňování a vzniku karbidů. Tudíž je velice důležité množství uhlíku obsaženého ve slitině. Korozní odolnost je dána množstvím chromu. Obecně můžeme říci, že měkčí slitiny se používají pro aplikace s vyšší provozní teplotou, jako jsou turbínové lopatky. Naproti tomu materiály spadající do kategorie tvrdších jsou využívány v aplikacích, kde mohou využít svoji odolnost proti opotřebením. [17]

Většina dnes komerčně využívaných slitin na bázi kobaltu vychází z ternárních slitin Co-Cr-W a Co-Cr-Mo, které byly vyvinuty na začátku tohoto století. O odhalení se zasloužil Elwood Haynes, který objevil vysokou pevnost a korozivzdornost binární slitiny kobalt-chrom. Později identifikoval wolfram a molybden jako velmi silné zpevňující prvky v systému na bázi kobalt-chrom. Když Elwood Haynes objevil tyto slitiny, pojmenoval je Stellite, podle latinského slova stella, což znamená hvězda. Důvodem byl jejich třpytivý lesk. [17]

5.4.1 Slitiny kobaltu s vysokou odolností proti opotřebením

Obecně můžeme říci, že kobalt je v těchto slitinách přítomen v kubické mřížce plošně středěné. Jedná se tudíž o jeho nestabilní krystalografickou podobu za běžných teplot. Jeho nestabilita je dána tím, že při ochlazování velice pomalou rychlostí dochází k překrytí na mřížku hexagonální s těsným uspořádáním. Zachování vysokoteplotní krystalové mřížky za běžných teplot je umožněno díky legujícím prvkům. [17]

Dnešní slitiny kobaltu odolávající opotřebením jsou trochu jiné, od slitin objevených Elwoodem Haynes. Hlavním rozdílem je kontrované množství uhlíku a křemíku. Tyto prvky byly dříve považované za nežádoucí nečistoty. Dalším velkým rozdílem v dnešních slitinách Stellite je množství wolframu, který tvoří společně s uhlíkem karbidy. Množství a druh těchto karbidů ovlivňují mikrostrukturu během tuhnutí. [17]

Druhy slitin s chemickým složením jsou v tabulce níže (Tabulka 10).

Slitina	Nominální složení, wt%									
Tradename	Co	Cr	W	Mo	C	Fe	Ni	Si	Mn	Others
Slitiny ke slévání, prášková metalurgie (P/M), slitiny pro navařování										
Stellite 1	bal	30	13	0.5	2.5	3	1.5	1.3	0.5	...
Stellite 3(P/M)	bal	30.5	12.5	...	2.4	5 (max)	3.5 (max)	2 (max)	2 (max)	1 B (max)
Stellite 4	bal	30	14	1 (max)	0.57	3 (max)	3 (max)	2 (max)	1 (max)	...
Stellite 6	bal	29	4.5	1.5(max)	1.2	3 (max)	3 (max)	1.5 (max)	1 (max)	...
Stellite 6 (P/M)	bal	28.5	4.5	1.5(max)	1	5 (max)	3 (max)	2 (max)	2 (max)	1 B (max)
Stellite 12	bal	30	8.3	...	1.4	3 (min)	1.5	0.7	2.5	...
Stellite 2	bal	27	...	5.5	0.25	3 (max)	2.75	1 (max)	1 (max)	0.007 B(max)
Stellite 98M2(P/M)	bal	30	18.5	0.8(max)	2	5 (max)	3.5	1 (max)	1 (max)	4.2 V, 1 B (max)
Stellite 703	bal	32	...	12	2.4	3 (max)	3 (max)	1.5 (max)	1.5 (max)	...
Stellite 706	bal	29	...	5	1.2	3 (max)	3 (max)	1.5 (max)	1.5 (max)	...
Stellite 712	bal	29	...	8.5	2	3 (max)	3 (max)	1.5 (max)	1.5 (max)	...
Stellite 720	bal	33	...	18	2.5	3 (max)	3 (max)	1.5 (max)	1.5 (max)	0.3 B
Stellite F	bal	25	12.3	1 (max)	1.75	3 (max)	22	2 (max)	1 (max)	...
Stellite Star J(P/M)	bal	32.5	17.5	...	2.5	3 (max)	2.5 (max)	2 (max)	2 (max)	1 B (max)
Stellite Star J	bal	32.5	17.5	...	2.5	3 (max)	2.5 (max)	2 (max)	2 (max)	...
TantungG	bal	29.5	16.5	...	3	3.5	7 (max)	...	2 (max)	4.5 Ta/Nb
Tantung 144	bal	27.5	18.5	...	3	3.5	7 (max)	...	2 (max)	5.5 Ta/Nb
Slitiny s obsahem Lavesových fází										
Tribaloy T-400	bal	9	...	29	...	...	...	2.5	...	...
Tribaloy T-800	bal	18	...	29	...	...	...	3.5	...	...
Tvářené										
Stellite 6B	bal	30	4	1.5 max	1	3 (max)	2.5	0.7	1.4	...
Stellite 6K	bal	30	4.5	1.5 max	1.6	3 (max)	3 (max)	2 (max)	2 (max)	...

Tabulka 10. Slitiny kobaltu s vysokou odolností proti opotřebení[17]

Z tabulky můžeme určit, že jeden z rozdílů jednotlivých Stelliteů je v množství uhlíku, tudíž množství objemu karbidických částí v materiálu. Například při množství uhlíku 2,4wt% (Stellite 3) je obsah karbidů v materiálu 30wt%. Jedná se především o karbidy typu M_7C_3 a M_6C , kde M reprezentuje kovový prvek např. M_7C_3 může být Cr_7C_3 . Při množství 1wt% (Stellite 6B) je obsah karbidů již jen 13wt%. Tvar a rozměr je výrazně ovlivněn ochlazovací rychlostí.

Chrom má ve slitinách Stelliteu dvě důležité funkce. Jedná se o tvorbu karbidů a také výrazně ovlivňuje matici legováním. Jelikož zvyšuje pevnost materiálu, odolnost proti korozi a oxidaci.

Legováním wolframu a molybdenu se zvyšuje pevnost základní matrice kobaltových slitin. Pokud jsou obsaženy ve větším množství (Stellite 1) účastní se na vzniku karbidů během tuhnutí a zlepšují precipitaci karbidu typu M_6C . Taktéž zvyšují korozní odolnost slitin.[17]

Mezi slitiny vykazující vysokou odolnost proti opotřebení řadíme také Tribaloye. Jedná se o slitiny, které obsahují lavesovy fáze. Do těchto slitin je přidáváno určité množství molybdenu a křemíku pro zvýšení precipitace vysoce tvrdých a korozně odolných lavesových fází. Jedná se o vysoce tvrdé eutektikum CoMoSi nebo Co_3Mo_2Si . Uhlík je zde držen na nejnižší úrovni, aby se zabránilo vzniku karbidům. Jelikož je v těchto slitinách velké množství tohoto intermetalika (35-70%) jsou výrazně ovlivněny všechny materiálové charakteristiky.[17]

5.4.2 Slitiny kobaltu pracující za vysokých teplot

Slitiny na bázi kobaltu nejsou rozšířeny v takovém množství, jako niklové či slitiny na bázi niklu a železa, pro aplikace za vysokých teplot. Navzdory tomuto mají v těchto aplikacích své důležité místo. Je to díky odolnosti proti teplotní korozi a vysoké pevnosti při vyšších teplotách. V následujících dvou tabulkách (Tabulka 11, Tabulka 12) jsou uvedeny slitiny kobaltu pracující za vysokých teplot včetně jejich chemického složení.

Slitina	Nominální složení, wt%									
Tradenname	Co	Cr	W	Mo	C	Fe	Ni	Si	Mn	Ostatní
Tvářené										
Haynes 25(L605)	bal	20	15	...	0.1	3 (max)	10	0.4 (max)	1.5	...
Haynes 188	bal	22	14	...	0.1	3 (max)	22	0.35	1.25	0.03 La
Inconel 783	bal	3	...	...	0.03(max)	25.5	28	0.5 (max)	0.5 (max)	5.5Al, 3Nb, 3.4Ti (max)
UMCo-50	bal	28	...	...	0.02(max)	21	...	0.75	0.75	...
S-816 R	40(min)	20	4	4	0.37	5 (max)	20	1 (max)	1.5	4 Nb

Tabulka 11. Slitiny kobaltu pracující za vysokých teplot, zpracované tvářením[17]

Slitina	Nominální složení, wt%												
Tradenname	C	Ni	Cr	Co	Mo	Fe	Al	B	Ti	Ta	W	Zr	Ostatní
AiResist 13	0.45	...	21	62	...	...	3.4	...	...	2	11	...	0.1 Y
AiResist 213	0.20	0.5	20	64	...	0.5	3.5	...	...	6.5	4.5	0.1	0.1 Y
AiResist 215	0.35	0.5	19	63	...	0.5	4.3	...	...	7.5	4.5	0.1	0.1 Y
FSX-414	0.25	10	29	52.5	...	1	...	0.010	...	...	7.5	...	...
Haynes 25	0.1	10	20	54	...	1	...	...	...	...	15	...	...
J-1650	0.20	27	19	36	...	...	...	0.02	3.8	2	12	...	...
MAR-M302	0.85	...	21.5	58	...	0.5	...	0.005	...	9	10	0.2	...
MAR-M322	1.0	...	21.5	60.5	...	0.5	...	...	0.75	4.5	9	2	...
MAR-M509	0.6	10	23.5	54.5	...	...	...	...	0.2	3.5	7	0.5	...
NASA	0.40	...	3	67.5	...	...	...	...	1	...	25	1	2 Re
Stellite 23 Si	0.40	2	24	65.5	...	1	...	...	...	...	5	...	0.3 Mn, 0.6
Stellite 27 Si	0.40	32	25	35	5.5	1	...	...	...	...	...	...	0.3 Mn, 0.6
Stellite 30 Si	0.45	15	26	50.5	6	1	...	...	...	...	...	...	0.6 Mn, 0.6
Stellite 31 Si	0.50	10	22	57.5	...	1.5	...	...	...	...	7.5	...	0.5 Mn, 0.5

Tabulka 12. Slitiny kobaltu pracující za vysokých teplot, slévárenské[17]

5.4.3 Slitiny kobaltu s vysokou odolností proti korozi

Ačkoliv některé slitiny kobaltu s vysokou odolností proti opotřebení také odolávají korozi ve vodním prostředí, je jejich aplikace omezena karbidačním síťovým na hranici zrn. Nedostatek důležitých legujících prvků v matici, který je způsoben vznikem karbidů a lavesových fází, má za následek, že u těchto slitin dochází k chemické nestejnorození v mikrostruktuře. Zvýšením homogenity mikrostruktury a nižším obsahem uhlíku můžeme dosáhnout, že některé slitiny kobaltu zvýší svoji odolnost proti korozi ve vodním prostředí. Ovšem stále je to nesrovnatelné se slitinami na bázi Ni-Cr-Mo. Proto byly vyvinuty slitiny Co-Ni-Cr-Mo, které skloubí výborné pevnostní charakteristiky za vysokých teplot, velice dobře odolává jakémukoliv opotřebení a jsou i vysoce korozivzdorné. Dosaženo je to nízkým obsahem uhlíku a legováním molybdenu.

V tabulce níže (Tabulka 13) jsou uvedeny některé slitiny i s jejich chemickým složením.

Slitina	Nominální složení, wt%										
	Co	Cr	W	Mo	C	Fe	Ni	Si	Mn	Others	
Ultimet (1233)	bal	26	2	5	0.06	3	9	0.3	0.8	0.08 N	
MP159	bal	19	...	7	...	9	25.5	...	...	3 Ti, 0.6Nb, 0.2Al	
MP35N	35	20	...	10	...	...	35	...	...	...
Duratherm 600	41.5	12	3.9	4	0.05(max)	8.7	bal	0.4	0.75	2 Ti, 0.7Al, 0.05Be	
Elgiloy	40	20	...	7	0.15(max)	bal	15.5	...	2	1 Be (max)	
Havar	42.5	20	2.8	2.4	0.2	bal	13	...	1.6	0.06 Be (max)	

Tabulka 13. Slitiny kobaltu s vysokou odolností proti korozi[17]

5.5 Povlaky na bázi kobaltu

5.5.1 Žárově stříkané

V tabulce níže (Tabulka 14) jsou uvedeny některé aplikace nástřiků slitin kobaltu, popřípadě slitiny, ve kterých je přítomnost kobaltu důležitá. Použití kobaltových slitin je velice rozšířené právě kvůli jejich vlastnostem. Důvody použití se tedy budou překrývat s požadavky dané aplikace.

Použití metod žárových nástřiků na bázi kobaltu lze nalézt téměř ve všech odvětvích průmyslu například: energetika, všeobecné strojírenství, automobilový průmysl, letecký a kosmický průmysl, těžké strojírenství, sklářský průmysl atd.[10]

Průmyslový sektor	Charakteristika	Slitina	Druh nástřiku	Součást
<i>Letecký a kosmický</i>	Odolávající adhezi	WC-Co	HVOF, detonační nástřik	Lopatky statoru, lopatky dmychadla,
	Odolávající korozi	NiCoCrAlYTa	Plasma ve vakuu	Lopatky turbíny,
	Obrusitelné povlaky	Kompozit CoNiCrAlY s BN a polyestr	Plasma	Části turbínových kroužků
		CoNiCrAlY	Plasma ve vakuu	Části turbínových kroužků
<i>Chemický průmysl</i>	Odolnost proti kavitaci	Hasteloy C-276	HVOF	Vrtné tyče
<i>Automotive</i>	Odolnost proti vysokým teplotám	NiCoCrAlYTa	HVOF	Části motoru
	Odolnost proti vysokým teplotám	Stellite 6	HVOF, Plasma	Sedla ventilů, hřídel čerpadla
<i>Energetika</i>	Odolnost proti erozi a kavitaci	CoCr-WC	HVOF	Vodní čerpadla
	Odolnost proti erozi, kavitaci a korozi	Stellite 6	HVOF	Turbínové lopatky
<i>Těžký průmysl</i>	Odolnost proti vysokým teplotám	WC-Co	Detonační nástřik	Části galvanických tratí
<i>Lékařský</i>	Bioinertní	CoCrMO	Plasma ve vakuu, Plasma	Protézy
<i>Papírenství</i>	Odolnost proti opotřebení	WC-Co	HVOF	Části válců

Tabulka 14. Aplikace slitin na bázi kobaltu nanesených pomocí žárového nástřiku[10]

Další slitiny na bázi kobaltu, které jsou nanášeny žárovým nástřikem, jsou uvedeny v tabulce níže (Tabulka 15). Seznam těchto slitiny byl čerpán z katalogu firmy Sulzer Metco.

Chemické složení	Velikost částic	Tradename	Charakteristika
<i>CoNiCrAlY + Nitrid boru + Polyester</i>			
Co 24Ni 16Cr 6Al 0.3Y 7BN 14Polyester	-176 +7.8 μm	Sulzer Metco 2042	-obrusitelné pro kompresory pracující za vysokých teplot
Co 25Ni 16Cr 6Al 0.3Y 4BN 15Polyester	-176 +11 μm	Sulzer Metco 2043	-excelentní odolnost proti oxidaci a korozi - provozní teploty 550°C pro titanové slitiny a od 750°C pro Inconely a korozivzdorné oceli
<i>CoNiCrAlY</i>			
Co 32Ni 21Cr 8Al 0.5Y	-90 +45 μm	Amdry 995C	-rovnováha mezi odolností proti oxidaci a korozi za vysokých teplot - pracovní teploty 850°C - mohou být upraveny technikami pos-treatment pro zlepšení vlastností
	-63 +45 μm	Amdry 995M	
	-63 +11 μm	Amdry 9954	
	-45 +22 μm	Diamalloy 4454	
	-45 +15 μm	Diamalloy 4700	
	-38 +5.5 μm	Amdry 9951	
	-38 +5.5 μm	Sulzer Metco 4451	
<i>CoCrW (Slitiny typu Stellite)</i>			
Co 23.4Cr 10Ni 7W 3.5Ta 0.6C	-45 +5 μm	Amdry MM509	-velice podobné slitinám Stellite
Co 25.5Cr 10.5Ni 7.5W 0.5C	-106 +37 μm	Amdry X40	-dobrá odolnost proti abrazi, pettingu a erozi
	-75 +45 μm	Metco 45C-NS	-užívané pro opravy povrchů kobaltových slitin
	-45 +5 μm	Metco 45VF-NS	-užívané pro části turbín a spalovacích motorů
Co 28.5Cr 4.5W 1.6Si 1C	-45 +11 μm	Diamalloy 4060NS	-provozní teploty 840°C
<i>CoCrAlY +Si+KNB</i>			
Co 25Cr 5Al 0.27Y 1.75Si 15hBN	-177 +10 μm	Amdry 958	-části kompresorových lopatek -kompatibilní s titanovými lopatkami - lepší vlastnosti ve srovnání CuNiIn nástřiky - provozní teploty 450°C
<i>CoMoCrSi (Slitiny typu Tribaloy)</i>			
Co 28.5Mo 17.5Cr 3.4Si podobný Tribaloy T-800	-45 +10 μm	Metco 4800	-velice podobné slitinám Tribaloy -excelentní odolnost opotřeбенí za vysokých teplot a samomazné
	-45 +10 μm	Metco 68F-NS-1	
	-45 +5.5 μm	Diamalloy 3001	
Co 28.5Mo 8.5Cr 2.6Si podobný Tribaloy T-400	-45 +10 μm	Metco 66F-NS	- odolné koroznímu prostředí (HCl, H2SO4, HCO2H, slaná voda)
	-45 +5.5 μm	Diamalloy 3002NS	

Tabulka 15. Kobaltové slitiny určené pro žárové nástřiky od firmy Sulzer Metco [20]

5.5.2 Navařované laserem – laser cladding

V tabulce níže (Tabulka 16) jsou uvedeny některé aplikace povlaků na bázi kobaltu nanášené metodou laserového navařování. Použití kobaltových slitin je velice rozšířené právě kvůli jejich vlastnostem. Oblast aplikací se překrývá s požadavky dané aplikace.

Použití slitin na bázi kobaltu, které byly nanášeny metodou laserového navařování, lze nalézt téměř ve všech odvětvích průmyslu například: energetika, automobilový průmysl, letecký a kosmický průmysl, těžké strojírenství, sklářský průmysl, všeobecné strojírenství, atd..

Průmysl	Komponenta	Slitina
<i>Letecký</i>	Lopatky vysokotlaké turbíny, kryt turbíny	Triballoy
	Části tryskových motorů	Stellite 6,
<i>Automotive</i>	Lopatky turbodmychadla	Triballoy
	Válce, ventily	Stellite 6
	Části spalovacího ústrojí motoru	Stellite, Triballoy T- 800
	Lopatky turbodmychadla	Stellite 6, Stellite SF
	Válce spalovacích motorů	Stellite 21
	Vačkový hřídel	Stellite 6
<i>Energetika</i>	Náběhové hrany lopatek parních turbín	Stellite 6
	Plynové turbíny	Stellite 6
	Části turbín pro atomový průmysl	Stellite 6
<i>Sklářský</i>	Kovadla pro výrobu skleněných lahví	Stellite 6
<i>Slévárenský</i>	Vysoko namáhané formy	Co-Cr-W-C
<i>Těžký</i>	Nástroje pro hluboké tažení	Stellite SF 6

Tabulka 16. Slitiny kobaltu nanášené metodou laserového navařování[21]

6 Použité experimentální metody

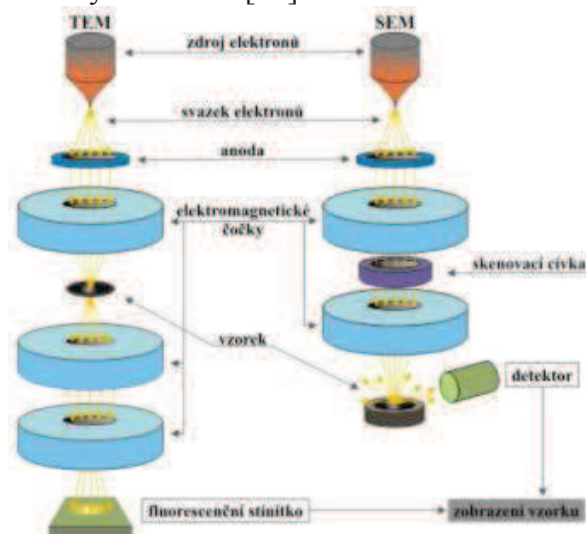
6.1 Řádkovací elektronová mikroskopie (SEM)

Elektronové mikroskopy jsou optické přístroje, které však místo světelného svazku používají elektrickým polem urychlené elektrony a místo skleněných čoček jsou použity čočky elektromagnetické. Aby nedocházelo k interakcím elektronů s atmosférou, která ovlivňuje dráhu letících elektronů, musí být pozorovaný vzorek i svazek elektronů umístěn ve vakuu. Jednou z hlavních charakteristik mikroskopů je mezní rozlišovací schopnost, jež je úměrná vlnové délce použitého záření. Elektronové záření s podstatně kratší vlnovou délkou (~0,01–0,001 nm), než má viditelné světlo (400–700 nm), umožňuje dosáhnout mnohem vyššího rozlišení. Typická velikost objektů, které lze pomocí elektronových mikroskopů sledovat je znázorněna na obrázku níže(Obrázek 6:1)[22]



Obrázek 6:1. Typická velikost objektů, které lze pozorovat elektronovým mikroskopem. Pro srovnání je uveden i rozsah světelného mikroskopu.[22]

Elektronové mikroskopy se dají zjednodušeně rozdělit do dvou kategorií, pro které se vžilo označení řádkovací elektronové mikroskopy neboli SEM (scanning electron microscope) a transmisní elektronové mikroskopy označované zkratkou TEM (transmission electron microscope). Schéma jejich optické soustavy je uvedeno na obrázku níže (Obrázek 6:2). Řádkovací elektronové mikroskopy se využívají pro zobrazení a analýzu povrchů téměř libovolně velkých vzorků (je-li dostatečně velká vakuová komora pro jejich umístění). Transmisní elektronové mikroskopy nacházejí využití při pozorování a analýze vnitřní struktury vzorku a pro zobrazení jednotlivých atomů. Nutnou podmínkou pro použití TEM je, že vzorek musí být dostatečně tenký (10–500 nm) aby jím svazek elektronů prošel. Zjednodušeně lze říci, že TEM vidí více než SEM, ale na úkor složitější přípravy vzorků a obtížnější interpretace získaných snímků.[22]



Obrázek 6:2. Schematická znázornění principu transmisního (vlevo) a řádkovacího (vpravo) elektronového mikroskopu.[22]

6.2 Energiově disperzní spektroskopie (EDX)

EDX se používá jako přídavné zařízení k řádkovacímu mikroskopu. Smyslem kvalitativní bodové mikroanalýzy je buď v mikroobjemu o velikosti několika málo μm^3 prokázat přítomnost určitého, předem vytypovaného prvku, nebo provést spektrální analýzu. EDX slouží k rychlému určení kvalitativního složení vzorku a s využitím standardů i semikvantitativního složení vzorku. Přednosti energiově disperzní spektroskopie jsou – jednoduchá obsluha, rychlé přehledné zpracování naměřených dat a možnost operativně přesně srovnávat získané spektrum nebo jeho část s polohou hlavní spektrální čáry nebo spektrálních čar hledaných prvků.[23]

Princip této metody:

Při bombardování vzorku primárními elektrony vzniká rentgenové záření, jehož detekce je zajištěna energiově disperzním spektrometrem. Výstupem analýzy EDX je spektrum četnosti rentgenového signálu v jednotlivých energetických oknech, což jsou charakteristické píky, které odpovídají jednotlivým prvkům a jejichž výška je úměrná koncentraci daného prvku ve vzorku.[23]

Použitý přístroj SEM / EDX:

Elektronový mikroskop Quanta 200 od firmy FEI s energiovým analyzátozem (EDS) od firmy EDAX k určování prvkového složení.

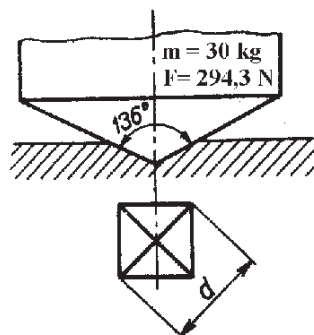
6.3 Měření tvrdosti

Tvrdość podle Vickerse- do materiálu se vtlačuje pod zatížením silou F (působí kolmo na povrch vzorku) diamantový pravidelný čtyřboký jehlan o daném vrcholovém úhlu mezi protilehlými stěnami po danou dobu. Následně se změří střední délka u obou úhlopříček vtisku. Zkušební zatěžující síla bývá od 10 do 1000 N. Doba zatížení se volí od 10 do 180 s. Použité zatížení píšeme do označení, např. HV 100 (HV 100 = 215). Pro běžně zkušební zatížení 300 N a dobu od 10 do 15 s se používá označení HV.

Tvrdość podle Vickerse se vyjadřuje bezrozměrně. Tvrdość je určena poměrem vtláčovací síly F a povrchu vtisku.[24]

$$HV = 0,189 \cdot (F / d^2)$$

F - síla vtláčování
 d - úhlopříčka vtisku.



Obrázek 6:3. Měření tvrdosti dle Vickerse [24]

Použitý přístroj: BruSell Sclerometer Durometer Duroscope Hardmeter Vickers Micro Hardness Tester

6.4 Měření zbytkových napětí odvrtávací metodou

Jednou z metod měření zbytkových napětí je odvrtávací metoda. Odvrtávací metoda zjišťování zbytkových pnutí je řazena mezi mechanické, semidestruktivní metody. Při narušení celistvosti vyvrtáním malého otvoru na povrchu součásti se uvolní zbytkové deformace. Tato deformace se měří pomocí tenzometrické růžice. Tato růžice je připevněna na povrchu konstrukce za pomoci lepidla. Růžice je složena většinou ze tří odporových tenzometrů, které jsou zapojeny do můstku či půlmůstku. Otvor se vrtá do průsečíku os tenzometrů. Vrtání se provádí v předem zvolených krocích a na konci každého kroku se provede měření uvolněných deformací. Takto se získá rozložení zbytkových deformací v daném místě do určité hloubky pod povrchem součásti. Tyto získané deformace po vyvrtání se poté vyhodnocují podle různých teorií, na jejichž základě se určuje rozložení zbytkových napětí v daném místě.[25]

Použitý přístroj:

Pro měření odvrtávací metodou byl použit systém SINT MT3000 firmy Hottiger Baldwin Messtechnik. Umožňující přesné odvrtávání otvoru frézou. Tato fréza je poháněna vysokorychlostní vzduchovou turbínou. Systém taktéž umožňuje odečtení rozměru otvoru pomocí zabudovaného optického mikroskopu, vytvořit záznam uvolněných deformací a vyhodnotit zbytkové napětí.

6.5 Měření opotřebení metodou „Ball-on-Flat“

Jedná se o standardní zkušební metodu pro stanovení opotřebení keramiky, kovů a jiných materiálů odolných proti opotřebení. Jako zkušební těleso je využito globoidního těleso (kulička), které se pohybuje po zkoušeném rovinném vzorku. Vzájemný pohyb je zajištěn lineárním oscilačním pohybem zkušebního indentoru za předem stanovených podmínek. Při této zkušební metodě působí zatížení svisle dolů a je vyvozeno pomocí indentoru. Parametry procesu jsou: normálo zatížení, délka stopy, oscilační frekvence, teplota, přítomnost maziva a doba testu.

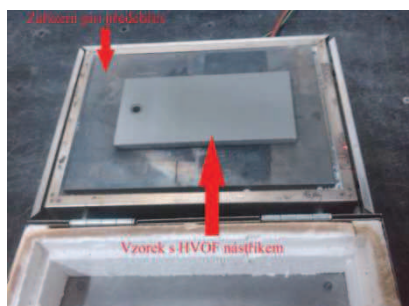
Výsledkem zkoušení odolnosti proti opotřebení pomocí metody „Ball-on-Flat“ je záznam koeficientu tření (COF) v průběhu testu, průměrná hodnota koeficientu tření a množství odebraného materiálu za daný časový úsek. Odebraný objem materiálu je vyhodnocen pomocí profilometru, který vytvoří záznam průběhu hloubky stopy.[26]

Použitý přístroj: Bruker UMT-3

7 Příprava vzorků

7.1 Příprava HVOF nástřiku

Vzorky HVOF nástřiku Stellite 6 pro laserové přetavení byly připraveny na pracovišti VZU Plzeň pomocí HP/HVOF nástřikového systému TAFA JP 5000. Žárový nástřik byl nanesen na ocelový plech tloušťky 10mm a rozměry 100x200mm.(viz Obrázek 7:1). Jednalo se o ocel s označením ČSN 11 527. Parametry nanášení HVOF nástřiku jsou uvedeny v tabulce níže (Tabulka 17). Před nástřikem byl povrch materiálu substrátu tryskán pomocí částic Al_2O_3 procedurou obvyklou ve VZU Plzeň. Tloušťka nanesené vrstvy žárového nástřiku se pohybovala mezi 400 až 500 μ m.



Obrázek 7:1. Ocelový plech s naneseným žárovým nástřikem metodou HVOF před laserovou modifikací

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

Tabulka 17. Parametry HVOF žárového nástřiku Stellite 6

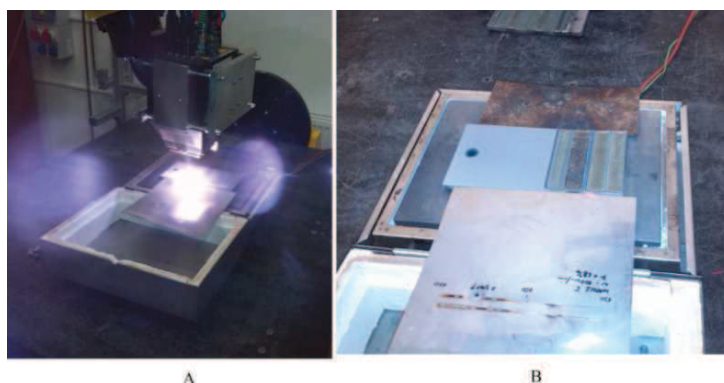
7.2 Použitý laser

Vysokovýkonný diodový laser ISL-4000L HPDD (High Power Direct Diode) laser ISL-4000L firmy Coherent s maximálním výstupním výkonem 4.3 kW září na vlnové délce 808 +/- 10 nm. Elektrická energie přiváděná do PN přechodů je přímo transformována na světelnou energii. Přestože účinnost elektro-optické přeměny se pohybuje kolem 50 %, je vyžadováno účinné chlazení elementů zabraňující tepelnému poškození. Výstupní svazek je přibližně 12x1 mm při fokální vzdálenosti 125 mm, což je vhodné především pro průmyslové aplikace (např. modifikace povrchů, povlakování, kalení). Použitím čočky lze svazek rozptýlit na rozměry 12x6 mm, což je pro některé aplikace vhodnější. Laserová hlava je umístěna na průmyslovém robotu Fanuc M-710iC.

8 Optimalizace parametrů laserového přetavení

8.1 Laserové přetavení a matice parametrů

Laserová modifikace žárového nástřiku byla provedena pomocí Laseru ISL-400L. Vzorek byl vždy předehřát na teplotu 350°C pomocí odporové ploténky (viz. Obrázek 7:1). Vždy po 3 laserových stopách byla zařazena delší pauza (5 min) pro snížení teploty, která stoupla v důsledku vnesené energie. Proces laserové modifikace je zachycen na obrázku níže (Obrázek 8:1)



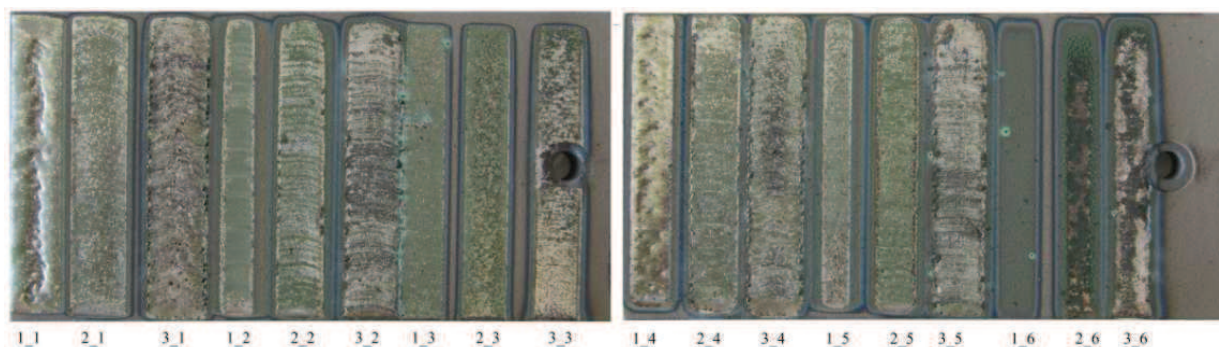
Obrázek 8:1. Laserová modifikace povrchu (A- probíhající proces laserové modifikace, B- vzorek po provedení 4 laserových stop)

Výsledné vzorky byly dosaženy při různých parametrech procesu laserové modifikace. Hodnota těchto parametrů je v tabulce níže (Tabulka 18). V této tabulce jsou vidět parametry, které byly měněny pro dosažení širokého spektra přetavených vzorků.

Vzorek	Výkon	Velikost Svazku X*Y		Energetická hustota	Rychlost pojezdu laseru
		[mm]	[mm]		
[-]	[W]	[mm]	[mm]	[J/mm ²]	cm/min
1_1	4280	12	1	21,39572	100,02
1_2	2140	12	1	21,39572	50,01
1_3	1070	12	1	21,39829	25,002
1_4	4280	12	6	21,39572	100,02
1_5	2140	12	6	21,39572	50,01
1_6	1070	12	6	21,39829	25,002
2_1	4280	12	1	42,79144	50,01
2_2	2140	12	1	42,79658	25,002
2_3	1070	12	1	42,80685	12,498
2_4	4280	12	6	42,79144	50,01
2_5	2140	12	6	42,79658	25,002
2_6	1070	12	6	42,80685	12,498
3_1	4280	12	1	85,59315	25,002
3_2	2140	12	1	85,6137	12,498
3_3	1070	12	1	85,65482	6,246
3_4	4280	12	6	85,59315	25,002
3_5	2140	12	6	85,6137	12,498
3_6	1070	12	6	85,65482	6,246

Tabulka 18. Matice parametrů laserového přetavení

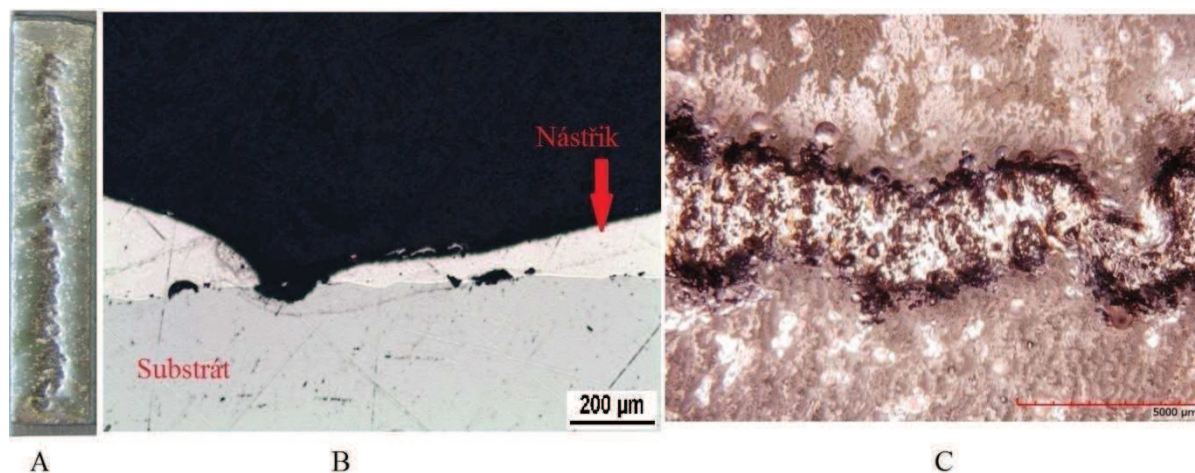
Výsledné vzorky při různých parametrech procesu jsou na obrázku níže (Obrázek 8:2). Na těchto snímcích si lze již povšimnout velký rozdíl v charakteru povrchu různých vzorků.



Obrázek 8:2. Vzorky po laserové modifikaci při různých parametrech

8.2 Mikrostruktura povlaků v závislosti na parametrech přetavení

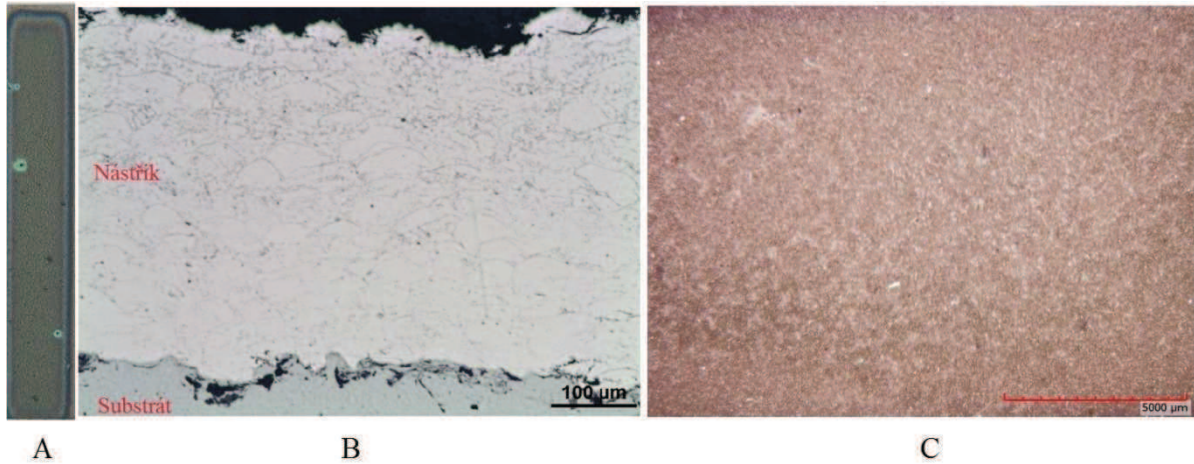
Studium mikrostruktury žárového nástřiku, přetaveného při různých parametrech bylo provedeno na světelném mikroskopu Nikon Epiphot 200. Na základě těchto pozorování byla sestavena tabulka (Tabulka 19), která popisuje charakter žárového povlaku Stellite 6 po laserové modifikaci. Cílem bylo určit množství pórů, defektů a změnu charakteru struktury. V některých případech došlo k vytvoření hlubokého protavení, které díky velké kinetické energii zcela odkrylo substrát, tento jev je možno pozorovat na obrázku níže (Obrázek 8:3-B)



Obrázek 8:3. HVOF nástřik Stellite 6 přetaven při parametrech 1_1 (A-Makrosnímek laserové stopy, B- mikrostruktura v příčném řezu, C- struktura povrchu)

Pro určení charakteru změny HVOF nástřiku byly navíc pořízeny snímky zachycující strukturu povrchu a taktéž makrosnímky plochy (Obrázek 8:3-C,A). Tyto snímky zlepšují představu o vlivu energie laserového paprsku na povrch žárového nástřiku a výsledky pozorování těchto snímků byly taktéž zaznamenány do tabulky popisující charakter přetavení (Tabulka 19).

Objevil se však i případ, kdy mikrostruktura žárového nástřiku nevykazovala výrazné změny (viz. Obrázek 8:4). Laserovou modifikací zřejmě došlo pouze k malému tepelnému ovlivnění s nízkou pravděpodobností změny vlastností nástřiku.



Obrázek 8:4. HVOF nástřík Stellite 6 přetaven při parametrech 1_6 (A-Makrosnímek laserové stopy, B- mikrostruktura v příčném řezu, C- struktura povrchu)

Vzorek	Výkon	Energetická hustota	Rychlost pojezdu laseru	Popis mikrostruktury v příčném řezu a povrchu nástřiku
[-]	[W]	[J/mm ²]	cm/min	[-]
1_1	4280	21,39572	100,02	Zcela protavený nástřik, odhalení substrátu, hluboká stopa po laserovém přetavení
1_2	2140	21,39572	50,01	Částečné protavení nástřiku (cca 3/4), přítomny póry na rozhraní nástřik-substrát, rozpoznatelný směr pohybu laserové hlavičky
1_3	1070	21,39829	25,002	Částečné protavení nástřiku (cca 1/2), přítomny póry na rozhraní nástřik – substrát, póry na povrchu nástřiku
1_4	4280	21,39572	100,02	Zcela protavený nástřik, přítomny póry a defekty na rozhraní nástřik-substrát, trhlina v nástřiku, hluboké stopy na povrchu vzorku po laserové modifikaci
1_5	2140	21,39572	50,01	Částečné protavení nástřiku (cca 1/2), přítomny defekty na rozhraní nástřik – substrát, póry na povrchu nástřiku
1_6	1070	21,39829	25,002	Bez protavení, přítomny defekty na rozhraní nástřik-substrát, povrch nástřiku bez pórů
2_1	4280	42,79144	50,01	Zcela protavený nástřik, přítomna trhlina v nástřiku, bez větších pórů v nástřiku, póry na povrchu nástřiku
2_2	2140	42,79658	25,002	Zcela protavený nástřik, přítomny póry a defekty na rozhraní nástřik-substrát, póry na povrchu nástřiku
2_3	1070	42,80685	12,498	Zcela protavený nástřik, přítomny póry na rozhraní nástřik-substrát a v také v nástřiku, póry na povrchu nástřiku
2_4	4280	42,79144	50,01	Zcela protavený nástřik, přítomny póry na rozhraní nástřik-substrát, trhlina v nástřiku, póry na povrchu nástřiku
2_5	2140	42,79658	25,002	Zcela protavený nástřik, přítomny póry a defekty na rozhraní nástřik-substrát, póry na povrchu nástřiku
2_6	1070	42,80685	12,498	Zcela protavený nástřik, přítomny póry a defekty na rozhraní nástřik-substrát, póry v nástřiku
3_1	4280	85,59315	25,002	Zcela protavený nástřik, došlo k smísení nástřiku a substrátu do značné hloubky, póry na povrchu nástřiku
3_2	2140	85,6137	12,498	Zcela protavený nástřik, póry a trhliny v nástřiku, póry na povrchu nástřiku a výrazné stopy po laserové modifikaci
3_3	1070	85,65482	6,246	Zcela protavený nástřik, velké množství malých pórů v nástřiku, póry na povrchu nástřiku
3_4	4280	85,59315	25,002	Zcela protavený nástřik, došlo k smísení nástřiku a substrátu do značné hloubky, póry na povrchu nástřiku
3_5	2140	85,6137	12,498	Zcela protavený nástřik, odhalení substrátu, hluboká stopa po laserovém přetavení
3_6	1070	85,65482	6,246	Zcela protavený nástřik, přítomny póry v nástřiku, póry na povrchu nástřiku, hluboká stopa po laserovém přetavení

Tabulka 19. Popis charakteru struktury a povrchu HVOF nástřiku při různých parametrech přetavení

8.3 Tloušťka HVOF nástřiku Stellite 6 po laserovém přetavení v závislosti na parametrech

Jedním z hodnocených parametrů, charakterizujících míru smísení materiálu povlaku s materiálem substrátu, je tloušťka přetavené oblasti. V některých případech došlo k výraznému promísení žárového nástřiku Stellite 6 se substrátem, proto se v určitých případech tloušťka HVOF nástřiku až zdvojnásobila. Tloušťka HVOF nástřiku Stellite 6 se pohybovala nejčastěji mezi hodnotami 420 až 500 μm , což je způsobené přípravou vzorku pro danou metodu (viz Tabulka 20).

Vzorek	1. Měření	2. Měření	3. Měření	Tloušťka přetavené oblasti	Poznámka
[-]	[μm]	[μm]	[μm]	[μm]	[-]
1_1	-	-	-	-	odhalení substrátu
1_2	394	427	435	419 \pm 22	
1_3	453	464	439	452 \pm 13	
1_4	411	519	494	475 \pm 57	
1_5	483	418	430	444 \pm 35	
1_6	481	452	474	469 \pm 15	
2_1	750	724	719	731 \pm 17	
2_2	494	502	470	489 \pm 17	
2_3	511	455	481	482 \pm 28	
2_4	708	677	704	696 \pm 17	
2_5	506	516	511	511 \pm 5	
2_6	470	454	472	465 \pm 10	
3_1	1810	1751	1723	1761 \pm 44	
3_2	724	725	685	711 \pm 23	
3_3	700	673	702	692 \pm 16	
3_4	1135	1055	1036	1075 \pm 53	
3_5	728	716	740	728 \pm 12	
3_6	-	-	-	-	odhalení substrátu

Tabulka 20. Tloušťka přetavené oblasti po laserové modifikaci

8.4 Výběr parametrů laserového přetavení – plně přetavený povlak, částečně přetavený povlak

Základem pro výběr optimálních parametrů laserového přetavení pro následné hodnocení vlastností přetavených povlaků bylo pozorování mikrostruktury v příčném řezu, charakteru povrchu a tloušťky HVOF nástřiku po laserové modifikaci. Pro následnou přípravu dalších experimentálních vzorků byly vybrány parametry, vedoucí ke dvěma odlišným tloušťkám přetavené oblasti. Cílem bylo porovnat vlastnosti zcela přetaveného HVOF nástřiku Stellite 6 vůči částečně přetavenému nástřiku.

Vybraný zástupce zcela přetaveného HVOF nástřiku byl vzorek s označením 2_3. Tento vzorek ačkoliv vykazoval určité množství pórů na rozhraní nástřik-substrát a také v samotném nástřiku, v porovnání se vzorky při jiných parametrech dosahoval nejlepší mikrostruktury. Hloubka tohoto nástřiku byla po přetavení 482 \pm 28 μm , což naznačovalo nepatrné promísení Stellite 6 se substrátem.

Tato hloubka promísení by měla být co možná nejtenčí, aby nedošlo k přílišnému promísení substrátu a přídavného materiálu, ale současně by měla být dostatečná pro zajištění silné metalurgické vazby[6].

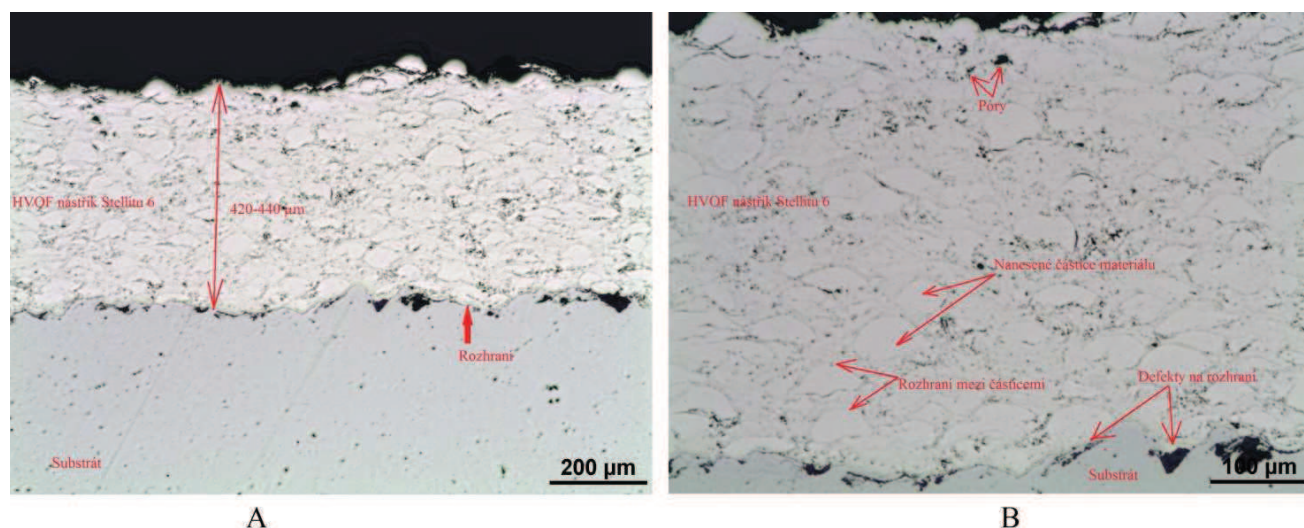
Jako zástupce částečně přetaveného HVOF nástřiku byl vybrán vzorek s označením 1_3. Jedná se o vzorek s částečným protavením cca do 1/2 celkové hloubky žárového nástřiku Stellite 6. Ve struktuře bylo přítomno určité množství pórů, znovu však v porovnání s ostatními vzorky dosahoval nejlepšího kvalitativního hodnocení.

9 Mikrostruktura

9.1 Mikrostruktura povlaku ve stavu po nástřiku

HVOF nástřik je deponován pomocí roztavených, částečně roztavených a neroztavených částic prášku deponovaného materiálu, který je unášen vysokou rychlostí směrem k substrátu (ocel ČSN 11 527). Výsledkem je lamelární mikrostruktura, která je vytvořena částicemi zcela natavenými (nebo částečně natavenými), které ulpívají pouze na povrchu ležících v dráze letících kapek. Nevyhnutelným důsledkem tohoto procesu je přítomnost pórů a pravděpodobně také oxidických částic. Hustota a pórovitost HVOF žárových nástřiků je velice závislá na parametrech procesu[12],[10].

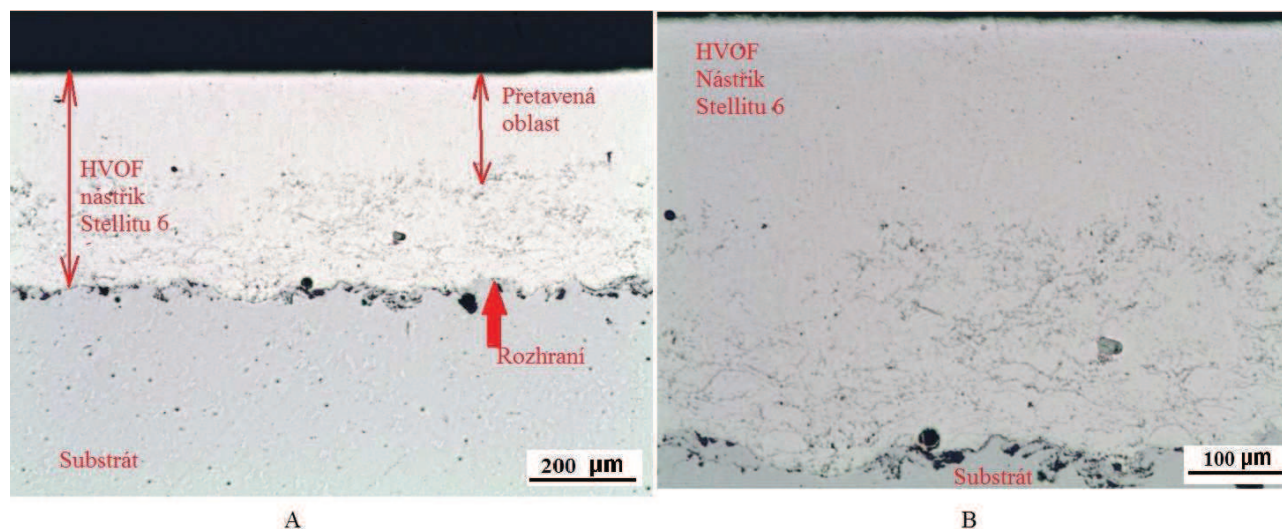
Obrázek níže (Obrázek 9:1 - A) ukazuje typickou mikrostrukturu HVOF nástřiku Stellite 6 v příčném řezu. Tento obrázek odhaluje přítomnost určitého množství pórů. Na detailním snímku Stellite 6 (Obrázek 9:1 - B) lze pozorovat typickou lamelární mikrostrukturu s množstvím hranic mezi nanesenými částicemi. Rozhraní mezi nástřikem a substrátem na tomto snímku ukazuje mechanickou vazbu s množstvím defektů a pórů. Póry se taktéž objevují přímo v žárovém nástřiku Stellite 6.



Obrázek 9:1. Mikrostruktura HVOF nástřiku Stellite 6 v příčném řezu (A- Obrázek nástřiku se substrátem, B- detailní snímek s popisem)

9.2 Mikrostruktura částečně přetaveného nástřiku

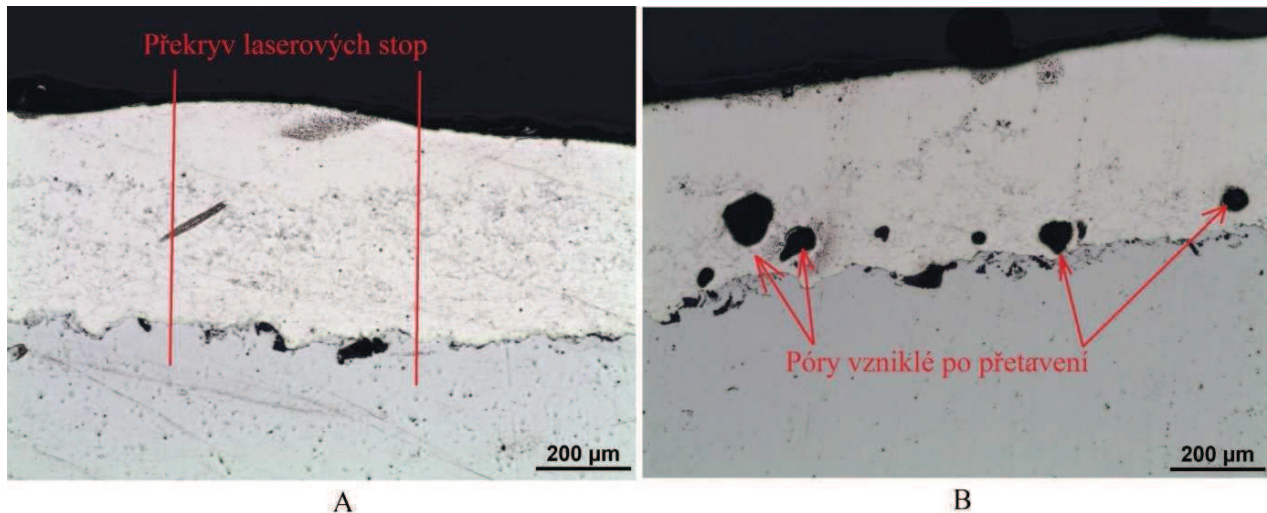
Na následujících snímcích (Obrázek 9:2, Obrázek 9:3) je zachycena struktura nástřiku, která byla laserově modifikována dle parametrů 1_3 (Tabulka 18). Pro další vyhodnocovací metody byla provedena depozice žárového nástřiku v několika stopách. Mezi jednotlivými laserovými stopami byla zařazena prodleva pro snížení teploty. Obrázek níže (Obrázek 9:2- A) ukazuje žárový nástřik v příčném řezu, kde je snadno poznat hloubku protavené vrstvy, která odpovídá cca $\frac{1}{2}$. Na obrázku vpravo (Obrázek 9:2 - B) je detail protavené vrstvy, kde je možné pozorovat homogenizaci struktury nástřiku.



Obrázek 9:2. Mikrostruktura HVOF nástřiku Stellite 6, který byl částečně přetaven dle parametrů 1_3, v příčném řezu (A- Obrázek nástřiku se substrátem, B- detailní snímek)

Na obrázku níže (Obrázek 9:3- A) je zachycen překryv laserových stop. Lze si povšimnout, že hloubka přetavení není příliš ovlivněna. Dochází ovšem ke změně tloušťky HVOF nástřiku v daném místě, proto se povrch nástřiku jeví jako vlnitý.

Částečně přetavený povlak Stellite 6 obsahoval póry (viz. Obrázek 9:3 -B), jež dosahovaly mnohem větších rozměrů než póry, které vznikají při žárovém nanášení. Příčina vzniku těchto pórů není zcela jasná. Může se jednat o spojení menších pórů, jež žárový nástřik obsahuje již po depozici. Tento jev pravděpodobně způsobuje vnější energie, která je dodána při přetavování nástřiku.



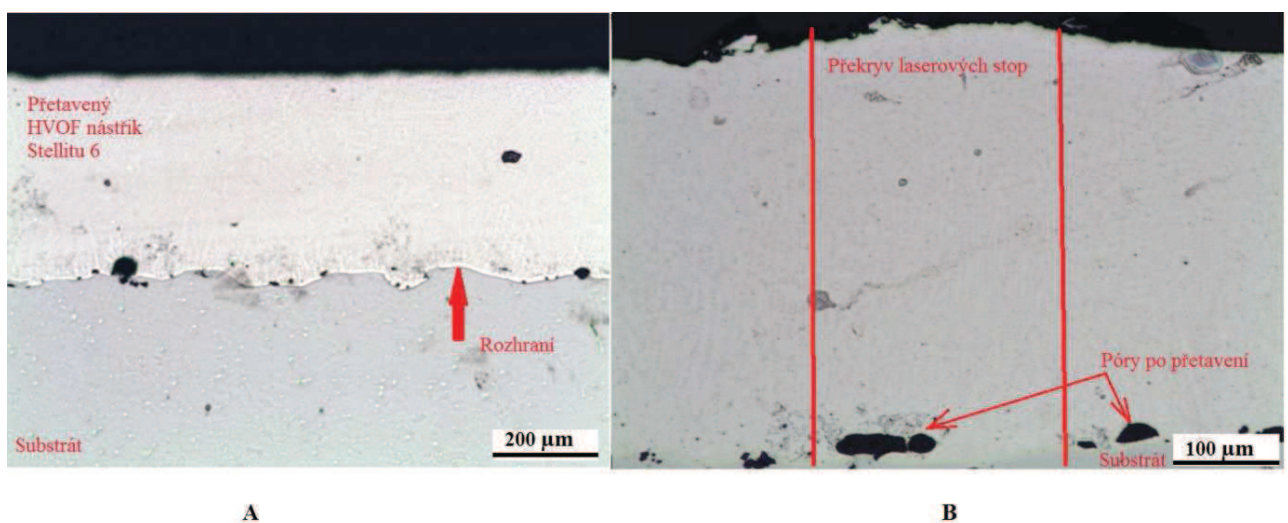
Obrázek 9:3. Mikrostruktura HVOF nástřiku Stellite 6, který byl částečně přetaven dle parametrů 1_3, v příčném řezu (A- Obrázek překryvu laserových stop, B- snímek zachycující póry po přetavení)

9.3 Mikrostruktura zcela přetaveného nástřiku

Na následujících snímcích (Obrázek 9:4 A, B) je zachycena struktura nástřiku, který byl laserově modifikován dle parametrů 2_3 (Tabulka 18). Pro další vyhodnocovací metody byla provedena depozice žárového nástřiku v několika stopách. Mezi jednotlivými laserovými stopami byla zařazena prodleva pro snížení teploty.

Obrázek 9:4 - A zachycuje žárový nástřik v příčném řezu, kde lze pozorovat, že nástřik byl zcela protaven. Dochází ke ztuhnutí rozhraní, které obsahuje mnohem méně defektů. Ovšem i zde je možno pozorovat přítomnost pórů na rozhraní a také ve vrstvě HVOF nástřiku.

Na obrázku vpravo (Obrázek 9:2- B) je detail protavené vrstvy, kde je možné pozorovat homogenizaci struktury nástřiku. Zde také při překryvu laserových stop došlo ke změně tloušťky HVOF nástřiku, proto se povrch nástřiku také jeví jako vlnitý.



Obrázek 9:4. Mikrostruktura HVOF nástřiku Stellite 6, který byl zcela přetaven dle parametrů 2_3, v příčném řezu (A- Obrázek nástřiku se substrátem, B- detailní snímek překryvu laserových stop)

10 Tvrdost

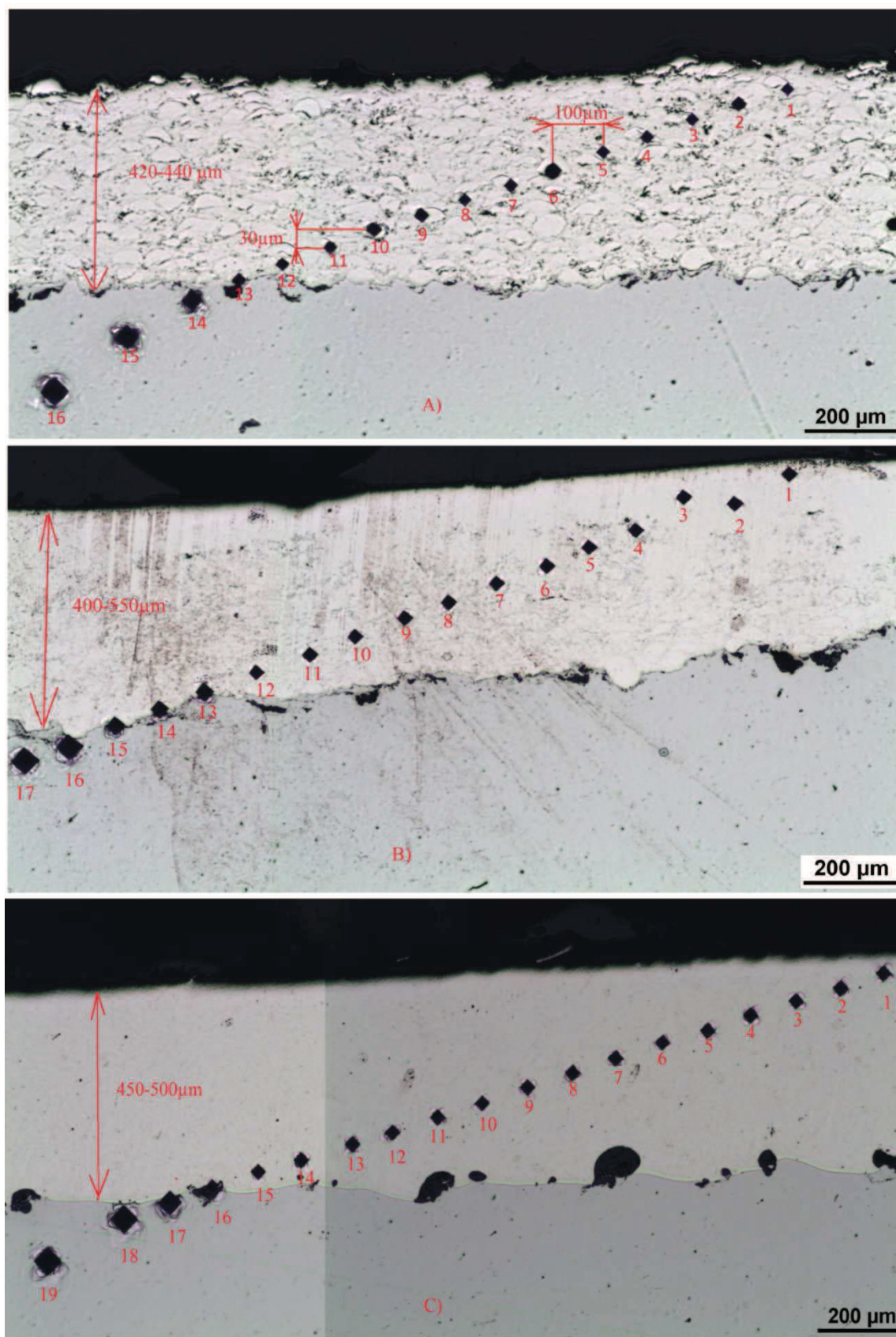
Měření probíhalo dle normy ČSN EN ISO 6507-1 při nominální hodnotě zatížení $F=2,942N$, což odpovídá zkoušce tvrdosti při nízkém zatížení. Profil tvrdosti od povrchu směrem k substrátu byl měřen na podélných výbrusech, které byly leštěny. Vzdálenost jednotlivých vtisků byla dostatečná (splňovala normu), aby nedošlo k interakci mezi novým vtiskem a mikrotrhlinami způsobené předešlým vtiskem. Rozmístění jednotlivých vtisků je znázorněno na obrázku níže (Obrázek 10:1) spolu se vzdáleností jednotlivých vtisků, odpovídajících posunutí v podélném směru o hodnotu $100\ \mu m$ a ve svislém směru $30\ \mu m$. Tyto hodnoty byly zvoleny tak, aby co nejlépe charakterizovaly profil tvrdosti vzorků.

Na obrázku, který zachycuje měření tvrdosti pro jednotlivé vzorky (Obrázek 10:1- A) si lze povšimnout, že tloušťka HVOF nástřiku variuje mezi hodnotami 420 až $440\ \mu m$, což je způsobené přípravou vzorku pro danou metodu. Hodnoty tloušťky vrstev pro zbylé vzorky (Obrázek 10:1 B, C) variují v širším rozmezí a dosahují vyšších hodnot, což je pravděpodobně způsobeno laserovým přetavením.

V tabulce níže (Tabulka 21) jsou zaznamenány naměřené hodnoty tvrdosti pro jednotlivé vzorky. Hodnoty označené zeleně značí hodnoty tvrdosti přechodové části, popřípadě substrátu. Z hodnot je zcela patrná nehomogenita HVOF nástřiku, kde hodnoty kolísají v širokém rozsahu (viz Graf 10:1). Tato nehomogenita je pravděpodobně způsobena defekty HVOF nástřiku jako jsou nenatavené částice, póry nebo oxidické částice. Ačkoliv průměrná hodnota tvrdosti je vyšší než u zbylých vzorků, velký rozptyl této hodnoty vede k velkému zkreslení výsledné hodnoty. U částečně přetaveného vzorku došlo k výrazné homogenizaci struktury, což vedlo k signifikantnímu snížení hodnoty směrodatné odchylky. Hodnoty naměřené tvrdosti byly v průměru jen nepatrně nižší než průměrná hodnota nepřetaveného HVOF nástřiku. Pro částečně přetavený vzorek byla naměřená vyšší hodnota tvrdosti než pro zcela přetavený vzorek. Z výsledků lze předpokládat, že laserovým přetavením HVOF nástřiku nedojde k signifikantnímu poklesu tvrdosti, pouze dojde k homogenizaci natavené vrstvy. (viz. Graf 10:2, Graf 10:3)

Na grafech zachycujících profil tvrdosti jednotlivých vzorků (Graf 10:1, Graf 10:2) lze pozorovat velmi výrazný pokles tvrdosti na přelomu nástřiku a substrátu. Pro částečně přetavený vzorek (Graf 10:2) je možno pozorovat, že hodnota tvrdosti neklesá příliš výrazně (hodnoty vtisků 13,14,15), tento jev je pravděpodobně způsoben opakovaným vytvářením vtisků do přechodové části. Proto lze předpokládat taktéž výrazný pokles hodnoty tvrdosti na přechodu mezi substrátem a nástřikem. Hodnota tvrdosti zcela přetaveného vzorku (Graf 10:3 vtisk 16) zakolísala na přechodové části, což je pravděpodobně způsobeno vytvořením vtisku do velice tvrdé částice. Hodnota tvrdosti poté již výrazně poklesne na hodnoty tvrdosti substrátu.

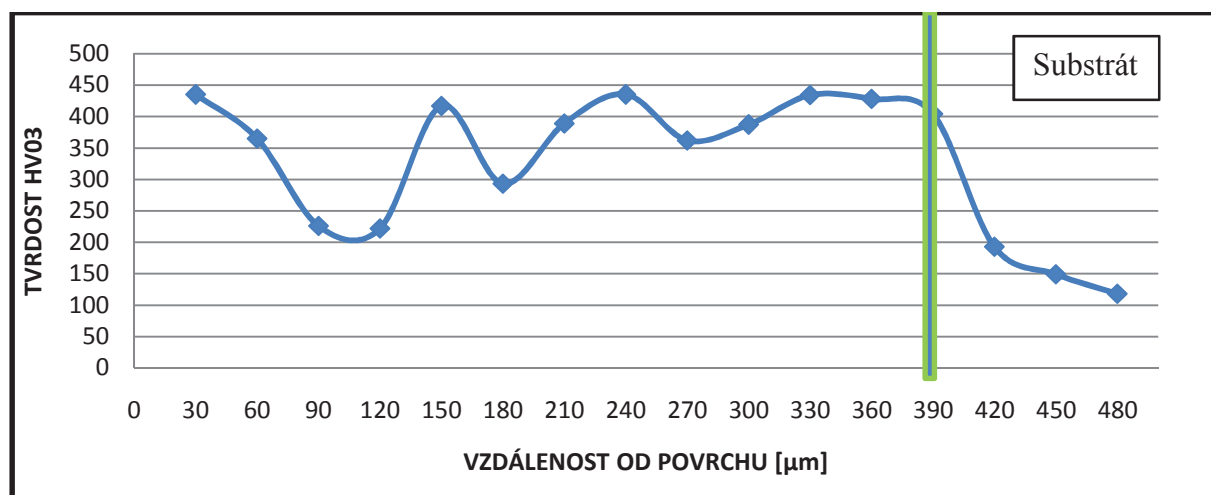
Porovnání profilů tvrdosti jednotlivých vzorků je zaznamenáno na grafu níže (Graf 10:4). Tento graf porovnává pouze tvrdosti povlaků bez přechodové části.



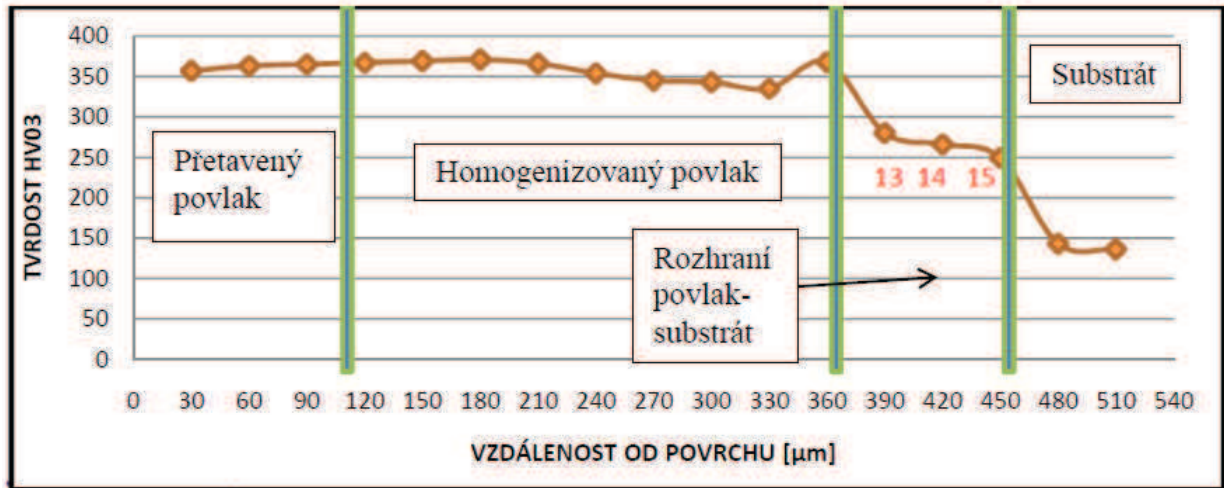
Obrázek 10:1. Snímky zachycující měření tvrdosti jednotlivých vzorků (A- HVOF, B- částečně přetavený (1_3), C- zcela přetavený (2_3))

Vtisk číslo	Vzdálenost od povrchu	HVOF	Částečně přetavený (1_3)	Zcela přetavený (2_3)
[-]	[μm]	[HV03]	[HV03]	[HV03]
1	30	435	357	335
2	60	365	363	332
3	90	226	365	356
4	120	222	367	350
5	150	417	369	330
6	180	293	371	359
7	210	389	366	321
8	240	435	354	323
9	270	362	345	336
10	300	387	343	348
11	330	434	335	335
12	360	428	368	337
13	390	404	280	345
14	420	193	266	326
15	450	149	249	337
16	480	118	143	458
17	510	-	136	157
18	580	-	-	122
19	650	-	-	121
Průměrná hodnota		369±76	359±12	338±11

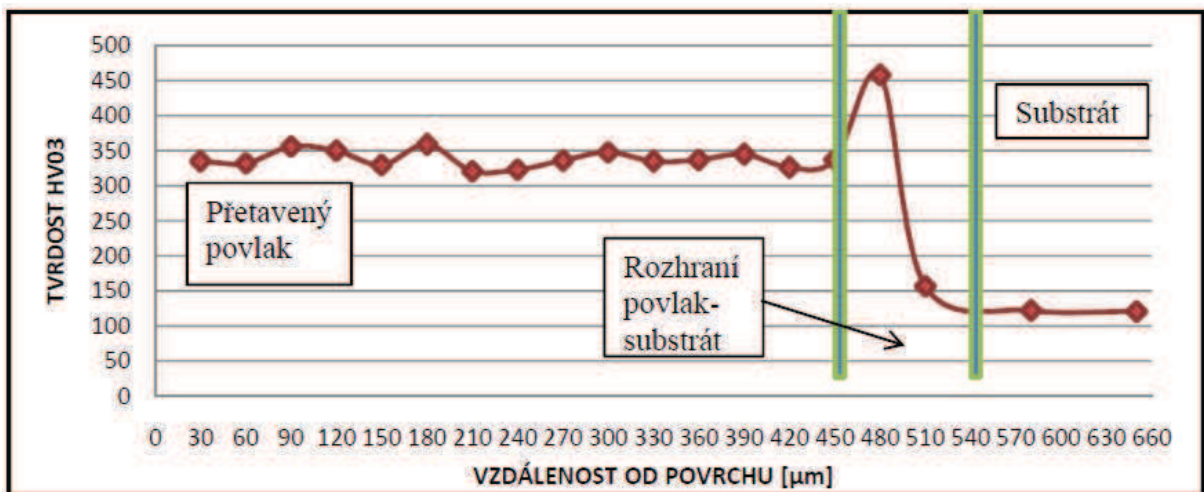
Tabulka 21. Naměřené hodnoty tvrdosti při nízkém zatížení pro jednotlivé vzorky (Do průměrné hodnoty nejsou zahrnuty hodnoty přechodové části a substrátu- označené zeleně)



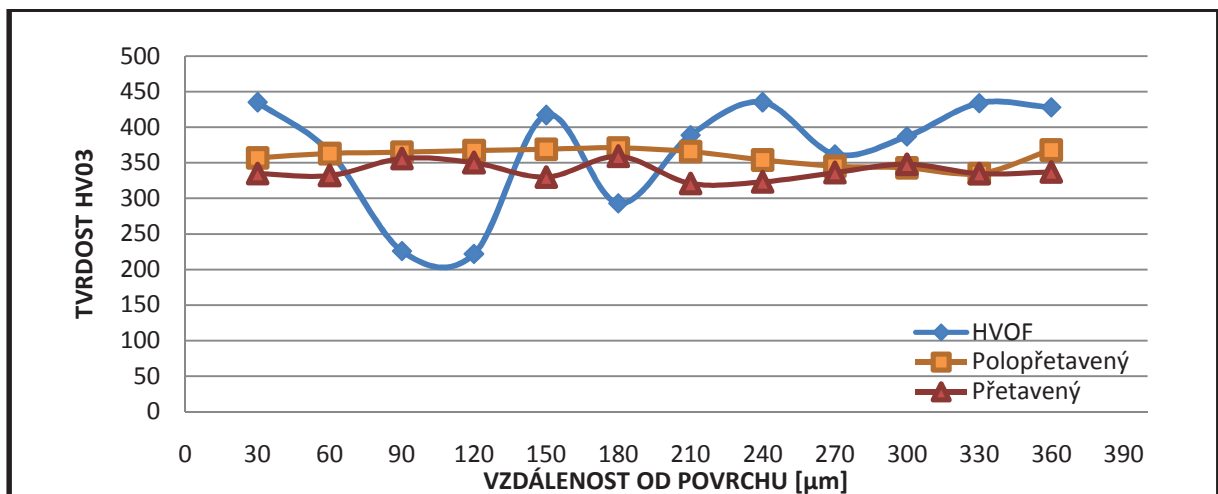
Graf 10:1. Průběh tvrdosti na vzdálenosti od povrchu pro HVOF nástřík



Graf 10:2. Průběh tvrdosti na vzdálenosti od povrchu pro částečně přetavený vzorek (dle parametrů 1_3)



Graf 10:3. Průběh tvrdosti na vzdálenosti od povrchu pro zcela přetavený vzorek (dle parametrů 2_3)



Graf 10:4. Průběh tvrdosti na vzdálenosti od povrchu pro všechny vzorky

11 Měření zbytkových napětí odvrtávací metodou

Pro měření zbytkových napětí byly vybrány pouze dva vzorky (HVOF a částečně přetavený dle parametrů 1_3), které byly vhodné pro tuto metodu. Důvodem nevhodnosti zcela přetaveného vzorku (dle parametrů 2_3) bylo velké množství pórů povrchové vrstvy a vlnitý charakter povrchu po přetavení. Charakter takového povrchu by způsobil velkou nepřesnost měření z důvodu špatné přilnavosti tenzometru a napětí při odvrtávání by mohlo být pohlceno velkým množstvím pórů.

Zbytkové napětí bylo vyhodnoceno metodikou podle normy ASTM E837–08 za použití integrální metody. K vyhodnocení byly použity kalibrační matice definované v normě. K výpočtu zbytkových napětí bylo použito programu mSint.

Z naměřených hodnot tvrdosti (Tabulka 21) vyplývá tvrdost povrchové vrstvy HV03=369±76 pro HVOF nástřik a pro částečně přetavený nástřik HV03= 359±12. Pro odvrtávání byly proto použity frézy HBM 1-SINTCTT/1, což jsou frézy potažené karbidem wolframu, které by měly mít dostatečné vlastnosti pro odvrtávání HVOF nástřiku Stellitu 6. Maximální hloubka otvoru je dána tloušťkou žárového nástřiku, která se pohybovala mezi hodnotami 400-450µm. Hodnoty uvolněných deformací na rozhraní byly vždy velice odlišné. Je velký předpoklad, že hodnoty naměřené na rozhraní mezi substrátem a nástřikem Stellitu 6 jsou zatíženy velkou chybou, proto samotné vyhodnocení bylo vždy prováděno pouze do hloubky, která zcela jistě odpovídala žárovému nástřiku.

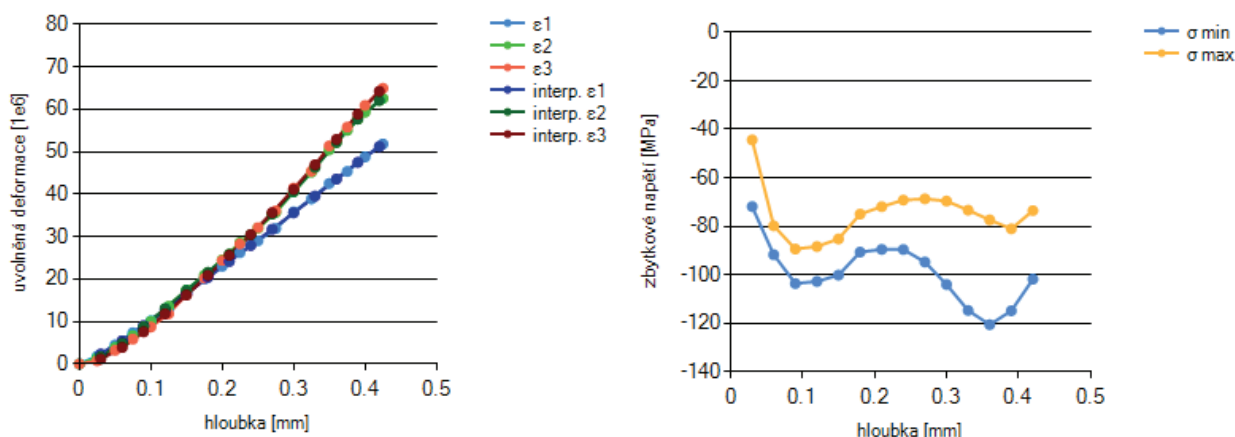
11.1 Výsledky měření zbytkových napětí HVOF nástřiku

V následující tabulce (Tabulka 22) jsou zaznamenány informace o měření HVOF nástřiku, který nebyl nijak upraven laserovou metodou. Jelikož nejsou známé vlastnosti Stellitu 6 v podobě HVOF nástřiku, byly hodnoty Youngova modulu pružnosti a Poissonova čísla převzaty ze studie HVOF nástřiků, která byla provedena na pracovišti VZU Plzeň [27].

Konečná hloubka otvoru byla zvolena vyšší, než byla hodnota tloušťky žárového nástřiku. Maximální hloubka otvoru byla však omezena zastavením frézy vlivem vysokého řezného odporu na rozhraní.

Materiál	Stellite 6
Zpracování	HVOF
Poissonova konstanta	0.3
Youngův modul pružnosti (MPa)	109000
Zařízení	SINT MTS 3000
Tenzometrická růžice	HBM 1,5/120RY61S
Fréza	HBM 1-SINTCTT/1
Poloměr otvoru (mm)	0.8075
Počet kroků	32
Celková hloubka (mm)	0.8
Průměr vrtáku (mm)	1,8
Průměr tenzometrické růžice (mm)	5.1
K-faktor	1.91

Tabulka 22. Informace o měření zbytkového napětí HVOF nástřiku



Obrázek 11:1. Uvolněné deformace a zbytková napětí v HVOF nástřiku

Plynulý průběh uvolněných deformací naznačuje homogenitu žárového povlaku. Tento jev částečně vyvrací závěry měření tvrdosti. Vyhodnocením byla zjištěna tlaková zbytková napětí, což odpovídá předpokladu [12].

Vyhodnocením byla zjištěna tlaková napětí cca 60-120MPa. Napětí se pravděpodobně lineárně mění od povrchu až do vzdálenosti 0,1mm. Poté je možné, že se drží mezi hodnotami -60 až -80 MPa. Následující změna hodnoty zbytkového napětí je pravděpodobně způsobena vlivem rozhraní, který mohlo hodnoty zkreslit. Velikost zbytkových napětí 120MPa je pod hodnotou meze kluzu daného materiálu ($R_{p0,2\%} = 700\text{MPa}$) dle materiálových dat [28], což zvyšuje věrohodnost výsledných hodnot. Důvodem je, že vyhodnocovací metody vycházejí z předpokladu platnosti Hookeova zákona.

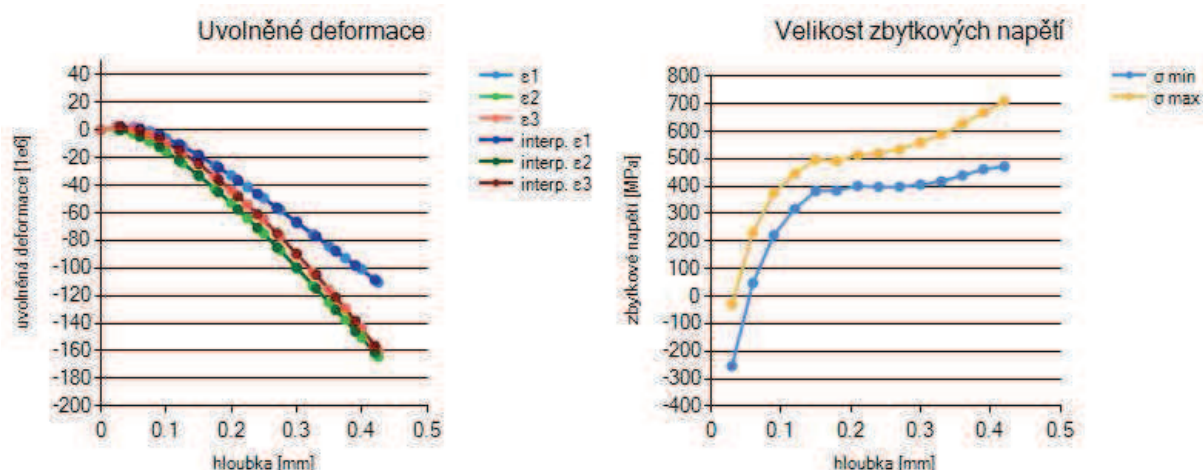
11.2 Výsledky měření zbytkových napětí částečně přetaveného nástřiku

V následující tabulce (Tabulka 23) jsou zaznamenány informace o měření HVOF nástřiku, který byl laserovou metodou částečně přetaven (dle parametrů 1_3). Youngův modul pružnosti byl vybrán z materiálových dat firmy Deloro Stellite [28]. Jelikož nejsou známy vlastnosti Stellite 6 v podobě HVOF nástřiku, který by byl navíc laserově přetaven, byly použity hodnoty Youngova modulu pružnosti a Poissonova čísla odpovídající materiálu, který byl zpracován litím. Důvodem je předpoklad, že laserovým přetavením dochází k vytvoření taveniny.

Konečná hloubka otvoru byla zvolena vyšší, než byla hodnota tloušťky žárového nástřiku. Maximální hloubka otvoru však byla omezena zastavením frézy stejně jako v předešlém případě.

Materiál	Stellite 6
Zpracování	REMELT
Poissonova konstanta	0.3
Youngův modul pružnosti (MPa)	209000
Zařízení	SINT MTS 3000
Tenzometrická růžice	HBM 1,5/120RY61S
Fréza	HBM 1-SINTCTT/1
Poloměr otvoru (mm)	0.8075
Počet kroků	32
Celková hloubka (mm)	0.8
Průměr vrtáku (mm)	1,8
Průměr tenzometrické růžice (mm)	5.1
K-faktor	1.91

Tabulka 23. Informace o měření zbytkového napětí HVOF nástřiku, který byl částečně přetaven



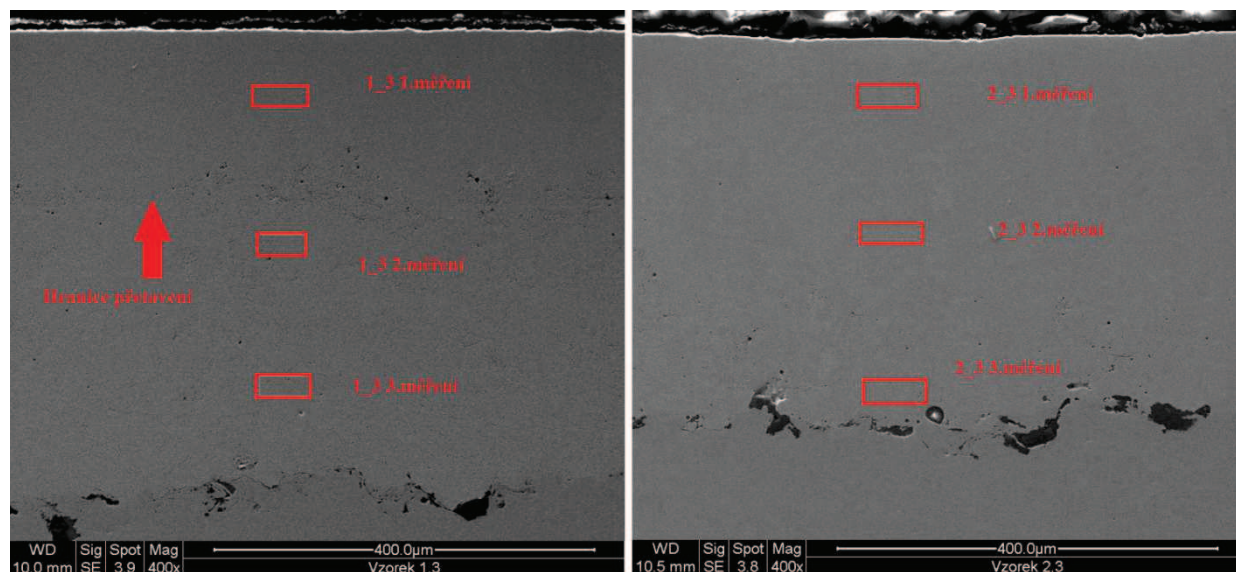
Obrázek 11:2. Uvolněné deformace a zbytková napětí HVOF nástřiku, který byl částečně přetaven

Plynulý průběh uvolněných deformací naznačuje homogenitu žárového povlaku, který byl laserově přetaven. Tento jev potvrzuje homogenitu, která byla zjištěna měřením tvrdosti. Vyhodnocením byla zjištěna tahová zbytková napětí, což je v přímém rozporu s měřením HVOF nástřiku, který nebyl laserově přetaven. Je zřejmé, že energie, která byla vložena laserovým přetavením, výrazně změnila rozložení zbytkových napětí. Materiál se zřejmě roztavil a při následném ochlazení došlo ke vzniku tahových napětí. Vyhodnocením bylo zjištěno tahové napětí cca 400-500MPa. Napětí pravděpodobně lineárně stoupá od povrchu až do vzdálenosti 0,15mm, poté se již ustálí na zmíněné hodnotě. Následující vzrůst hodnoty zbytkového napětí je pravděpodobně způsoben vlivem rozhraní, které mohly hodnoty zkeslit. Velikost zbytkových napětí 500MPa je pod hodnotou meze kluzu daného materiálu ($R_{p0,2\%} = 700\text{MPa}$) dle materiálových dat [28], což zvyšuje věrohodnost výsledných hodnot. Důvodem je, že vyhodnocovací metody vycházejí z předpokladu platnosti Hookeova zákona.

12 Určení prvkového složení

Prvkové složení bylo určeno pomocí elektronového mikroskopu SEM Quanta 200 FEI vybaveného zařízením EDAX NEW XL-30 s křemíkovým detektorem dopovaným lithiem.

Měření prvkového složení bylo provedeno na třech místech vzorků (Obrázek 12:1), které prošly laserovou modifikací a na jednom místě HVOF nástřiku Stellitu 6, který nebyl laserově modifikován. Velikost měřeného spotu byla 75x25 μm . Měření byla provedena na třech místech pro určení, zda došlo k promísení se substrátem a stanovení případného promísení. Místa měření jsou znázorněna na obrázku níže (Obrázek 12:1). Na tomto obrázku je také znázorněna hranice protavení pro částečně přetavený vzorek (dle parametrů 1_3).



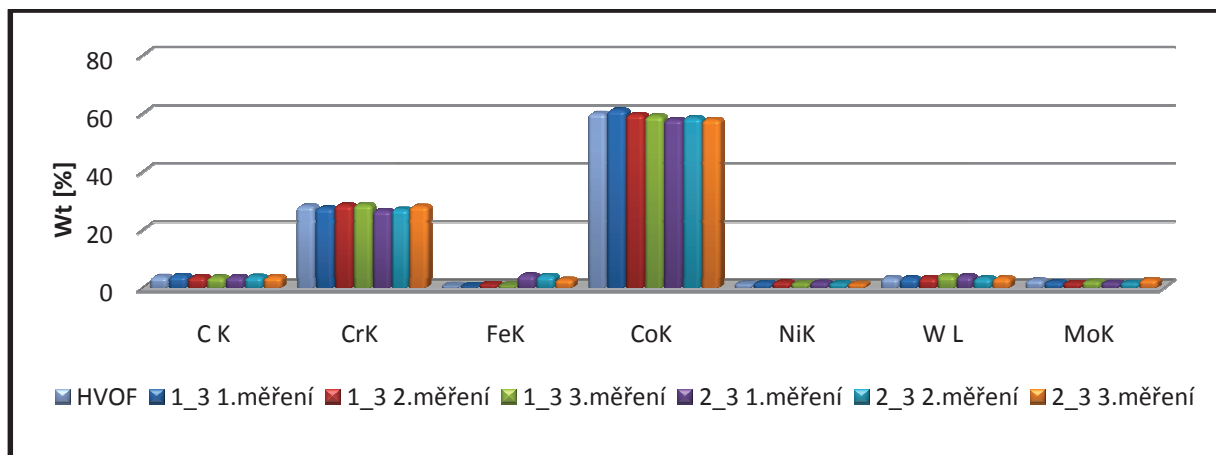
Obrázek 12:1. Měření prvkového složení pomocí EDX analýzy (vlevo 1_3, vpravo 2_3)

V tabulce níže (Tabulka 24) jsou zaznamenány hodnoty hmotnostních procent jednotlivých prvků pro všechna měření. Z naměřených hodnot i z grafu níže (Graf 12:1) je patrné, že v měřených lokalitách k promísení se substrátem nedošlo. Zjištěné hodnoty prvkového složení pro všechna měření zhruba odpovídají hodnotám naměřených pro HVOF nástřik Stellitu 6, který neprošel laserovou modifikací. Výsledky se shodují s hodnotami udávanými výrobcem [28].

	HVOF	1_3 1.měření	1_3 2.měření	2_3 3.měření	2_3 1.měření	2_3 2.měření	1_3 3.měření
Element	Wt[%]	Wt[%]	Wt[%]	Wt[%]	Wt[%]	Wt[%]	Wt[%]
C K	3,85	3,77	3,6	3,74	3,89	3,77	4,202
CrK	28,08	28,38	28,5	26,55	27,01	28,01	27,39
FeK	0,75	1,28	0,91	4,36	4,16	2,87	0,59
CoK	59,98	59,59	59,03	57,83	58,39	57,85	61,06
NiK	1,39	1,84	1,59	1,77	1,51	1,37	1,6
W L	3,37	3,45	4,24	4	3,31	3,35	3,29
MoK	2,57	1,68	2,14	1,76	1,74	2,78	1,87

Tabulka 24. Prvkové složení měřené pomocí EDX analýzy

Graf níže (Graf 12:1) porovnává jednotlivá měření prvkového složení, ze kterého je patrné, že pravděpodobně k žádnému promísení se substrátem nedochází. Naměřená změna hodnot je pod hodnotou zaznamenané chyby měření.



Graf 12:1. Srovnání prvkové složení pro jednotlivá měření

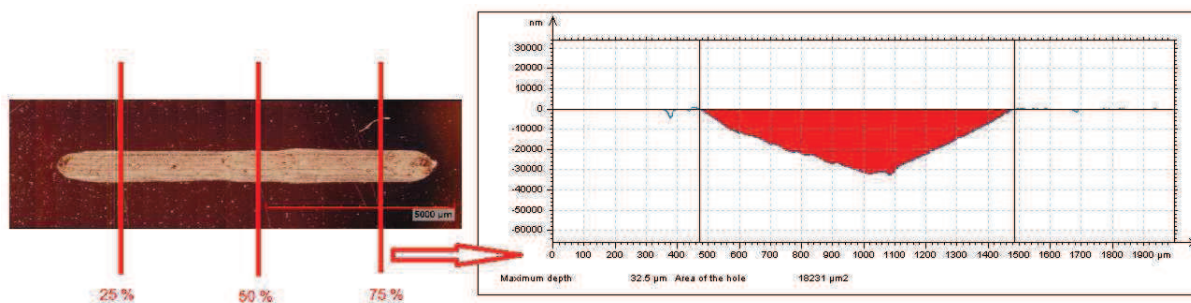
13 Odolnost proti opotřebení

Měření odolnosti proti opotřebení probíhalo dle normy ASTM G-133-05 Lineární oscilační „Ball-on-Flat“ test se uskutečnil, na stroji Bruker UMT-3. Parametry tohoto testu jsou zaznamenány v tabulce níže (Tabulka 25).

Délka stopy	Frekvence	Čas	Zatížení	Počet cyklů	Materiály zkušebního elementu	Průměr zkušebního elementu
Mm	Hz	s	N		[-]	mm
10	5	1000	25	5000	Ocel 100Cr6	6

Tabulka 25. Parametry zkoušky odolnosti proti opotřebení dle normy ASTM G-133-05

Následné vyhodnocení charakteru drážek bylo provedeno pomocí elektronového mikroskopu, který umožnil popsat mechanismus opotřebení. Dále byl využit profilometr KLA-Tencor P-6 Profiler pro zaznamenání průběhu hloubky stopy. Měření hloubky stopy probíhalo vždy ve třech místech drážky, jak je naznačeno na obrázku níže (Obrázek 13:1). Na tomto obrázku níže je také zaznamenán jeden z výstupů měření profilometru. Z tohoto výstupu lze určit maximální hloubku, průřez a charakter stopy po opotřebení. Tyto hodnoty pak byly zaznamenány do příslušných tabulek vždy pro tři měřené vzorky.



Obrázek 13:1. Měření drážek opotřebení pomocí profilometru

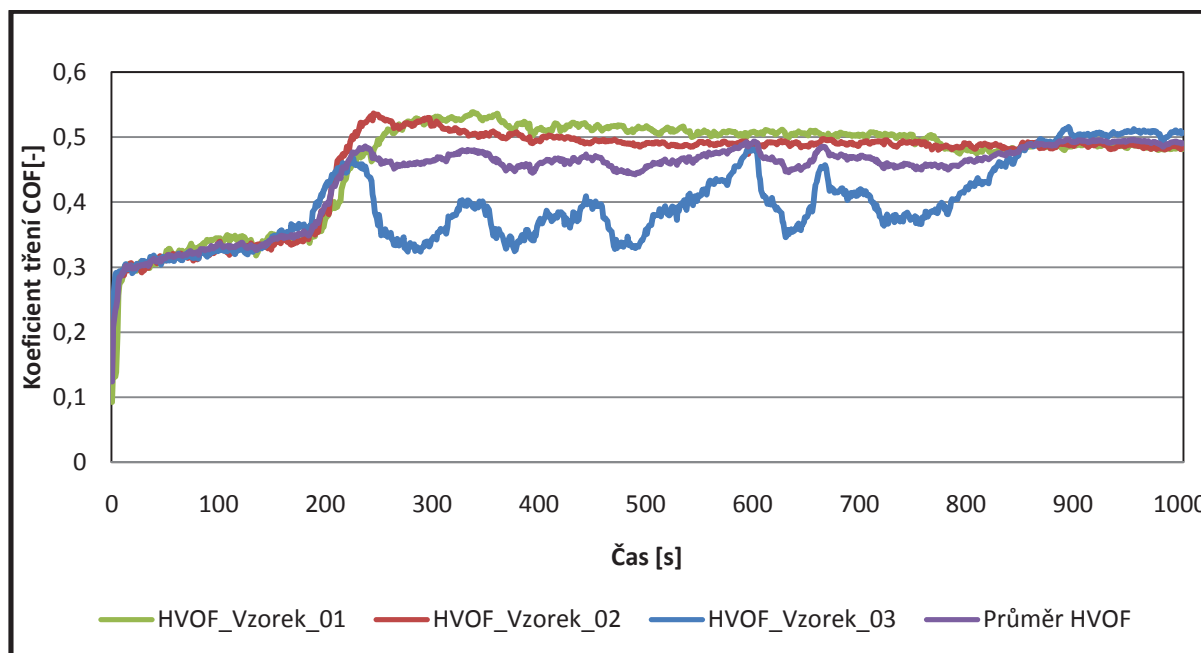
13.1 Výsledky měření odolnosti proti opotřebení HVOF nástřiku

Výsledné hodnoty měření opotřebení jsou v tabulce níže (Tabulka 26). Výsledná maximální hodnota hloubky drážky byla $28,6 \pm 7,7 \mu m$ a průměrná hodnota množství odebraného objemu materiálu byla $0,172 \pm 0,060 mm^3$.

Měření	Hloubka	Plocha	Odebraný objem	Odebraný objem
[-]	[μm]	[μm^2]	[μm^3]	[mm^3]
1. Vzorek 25%	30,4	14665	1,47E+08	1,47E-01
1. Vzorek 50%	21,9	10795	1,08E+08	1,08E-01
1. Vzorek 75%	23,3	13994	1,40E+08	1,40E-01
2. Vzorek 25%	22,4	13990	1,40E+08	1,40E-01
2. Vzorek 50%	21,6	13279	1,33E+08	1,33E-01
2. Vzorek 75%	26,9	18955	1,90E+08	1,90E-01
3. Vzorek 25%	33,1	19631	1,96E+08	1,96E-01
3. Vzorek 50%	32,5	18231	1,82E+08	1,82E-01
3. Vzorek 75%	45,1	31223	3,12E+08	3,12E-01
Průměr	28,6	17195	1,72E+08	1,72E-01
Směrodatná odchylka	7,7	6021	6,0E+07	6,0E-02

Tabulka 26. Výsledné hodnoty měření opotřebení, měřené pomocí profilometru, pro HVOF nástřik

Při zkoušce opotřebení byl taktéž zaznamenán průběh koeficientu tření COF v závislosti na čase (Graf 13:1). Na tomto grafu je patrná změna koeficientu zejména po překročení času 150 sekund, což může být důsledek vzniku mikročástic Stellitu 6 po vytržení z nástřiku v průběhu testu. Průměrná hodnota koeficientu tření COF byla $0,4406 \pm 0,0313$.



Graf 13:1. Průběh koeficientu tření v závislosti na čase pro HVOF nástřik

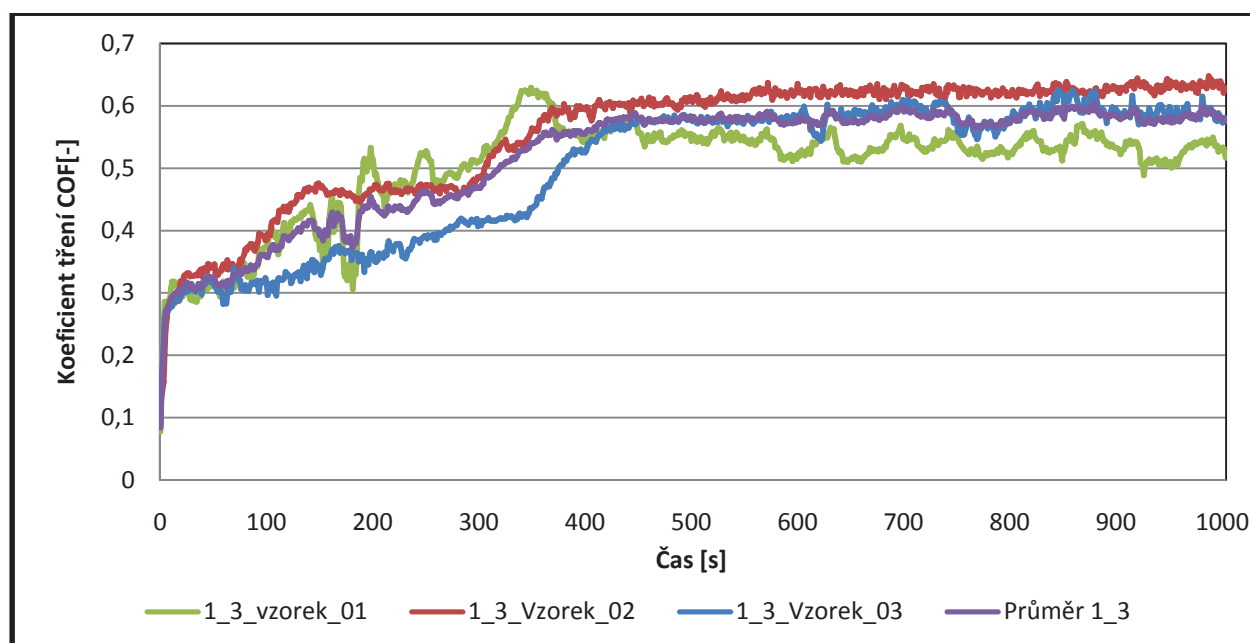
13.2 Výsledky měření odolnosti proti opotřebení částečně přetaveného nástřiku

Výsledné hodnoty měření opotřebení jsou v tabulce níže (Tabulka 27). Výsledná maximální hodnota hloubky drážky byla $9,6 \pm 1,0 \mu\text{m}$ a průměrná hodnota množství odebraného objemu materiálu byla $0,0355 \pm 0,0037 \text{ mm}^3$.

Měření	Hloubka	Plocha	Odebraný objem	Odebraný objem
[-]	$[\mu\text{m}]$	$[\mu\text{m}^2]$	$[\mu\text{m}^3]$	$[\text{mm}^3]$
1. Vzorek 25%	10,5	3793	3,79E+07	3,79E-02
1. Vzorek 50%	10,8	3901	3,90E+07	3,90E-02
1. Vzorek 75%	10,1	3482	3,48E+07	3,48E-02
2. Vzorek 25%	7,8	2661	2,66E+07	2,66E-02
2. Vzorek 50%	9,5	3422	3,42E+07	3,42E-02
2. Vzorek 75%	9,65	3623	3,62E+07	3,62E-02
3. Vzorek 25%	8,2	3510	3,51E+07	3,51E-02
3. Vzorek 50%	10,1	3621	3,62E+07	3,62E-02
3. Vzorek 75%	9,3	3921	3,92E+07	3,92E-02
Průměr	9,6	3548	3,55E+07	3,55E-02
Směrodatná odchylka	1,0	378	3,7E+06	3,7E-03

Tabulka 27. Výsledné hodnoty měření opotřebení, měřené pomocí profilometru, pro částečně přetavený nástřik (dle parametrů 1_3)

Při zkoušce opotřebení byl taktéž zaznamenán průběh koeficientu tření COF v závislosti na čase (Graf 13:2). Na tomto grafu je patrná postupná změna koeficientu do času cca 400 sekund, poté se koeficient ustálil kolem hodnoty 0,6. Průměrná hodnota koeficientu tření COF byla $0,5181 \pm 0,024$.



Graf 13:2. Průběh koeficientu tření v závislosti na čase pro částečně přetavený nástřik (dle parametrů 1_3)

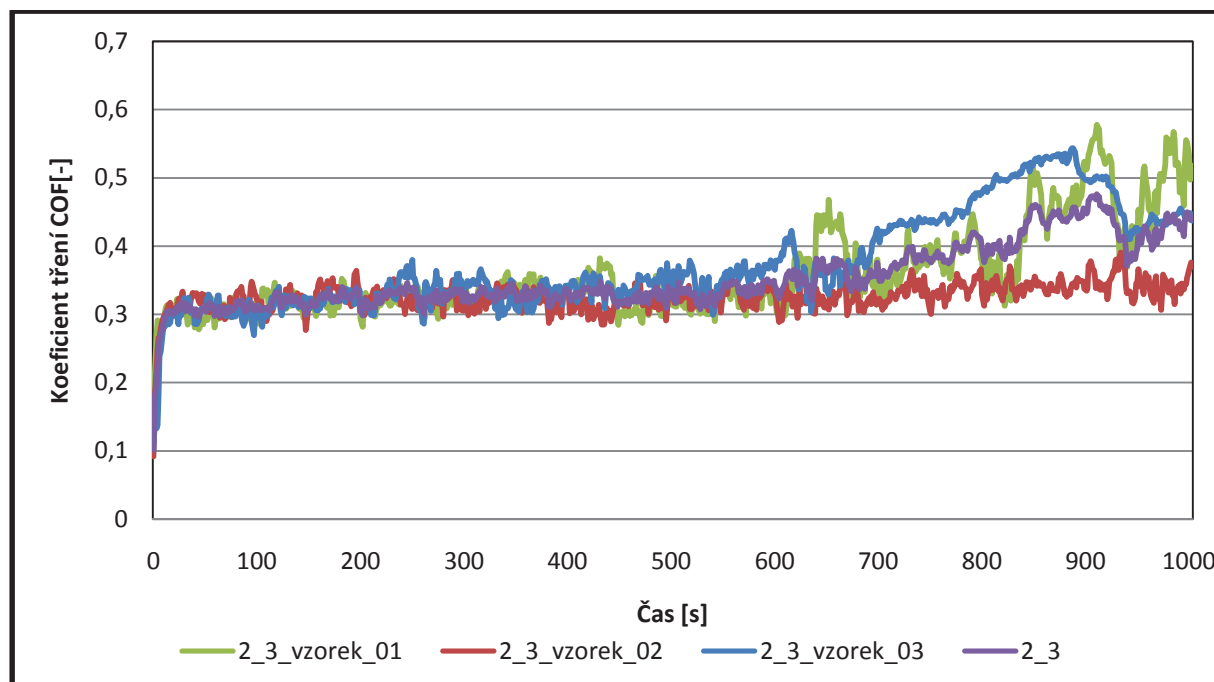
13.3 Výsledky měření odolnosti proti opotřebení zcela přetaveného nástřiku

Výsledné hodnoty měření opotřebení jsou v tabulce níže (Tabulka 28). Výsledná maximální hodnota hloubky drážky byla $32,0 \pm 4,3 \mu\text{m}$ průměrná hodnota množství odebraného objemu materiálu byla $0,168 \pm 0,043 \text{ mm}^3$.

Měření	Hloubka	Plocha	Odebraný objem	Odebraný objem
[-]	[μm]	[μm^2]	[μm^3]	[mm^3]
1. Vzorek 25%	29,6	14184	1,42E+08	1,42E-01
1. Vzorek 50%	28,8	12691	1,27E+08	1,27E-01
1. Vzorek 75%	27,4	13241	1,32E+08	1,32E-01
2. Vzorek 25%	37	22567	2,26E+08	2,26E-01
2. Vzorek 50%	32,6	18879	1,89E+08	1,89E-01
2. Vzorek 75%	40,2	24250	2,43E+08	2,43E-01
3. Vzorek 25%	27,7	12202	1,22E+08	1,22E-01
3. Vzorek 50%	32,6	16699	1,67E+08	1,67E-01
3. Vzorek 75%	32,2	16244	1,62E+08	1,62E-01
Průměr	32,0	16773	1,68E+08	1,68E-01
Směrodatná odchylka	4,3	4343	4,3E+07	4,3E-02

Tabulka 28. Výsledné hodnoty měření opotřebení, měřené pomocí profilometru, pro zcela přetavený nástřik (dle parametrů 2_3)

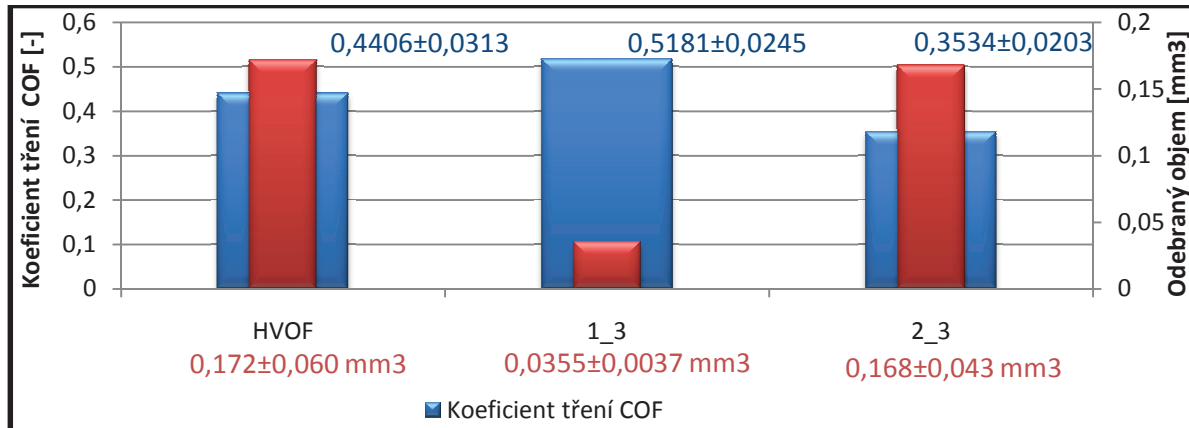
Při zkoušce opotřebení byl taktéž zaznamenán průběh koeficientu tření COF v závislosti na čase (Graf 13:3). Na tomto grafu je patrné, že hodnota koeficientu se pohybuje kolem hodnoty cca 0,3 do času zhruba 600 sekund. Poté se hodnota začíná měnit. Průměrná hodnota koeficientu tření COF byla $0,3534 \pm 0,0203$.



Graf 13:3. Průběh koeficientu tření v závislosti na čase pro zcela přetavený nástřik (dle parametrů 2_3)

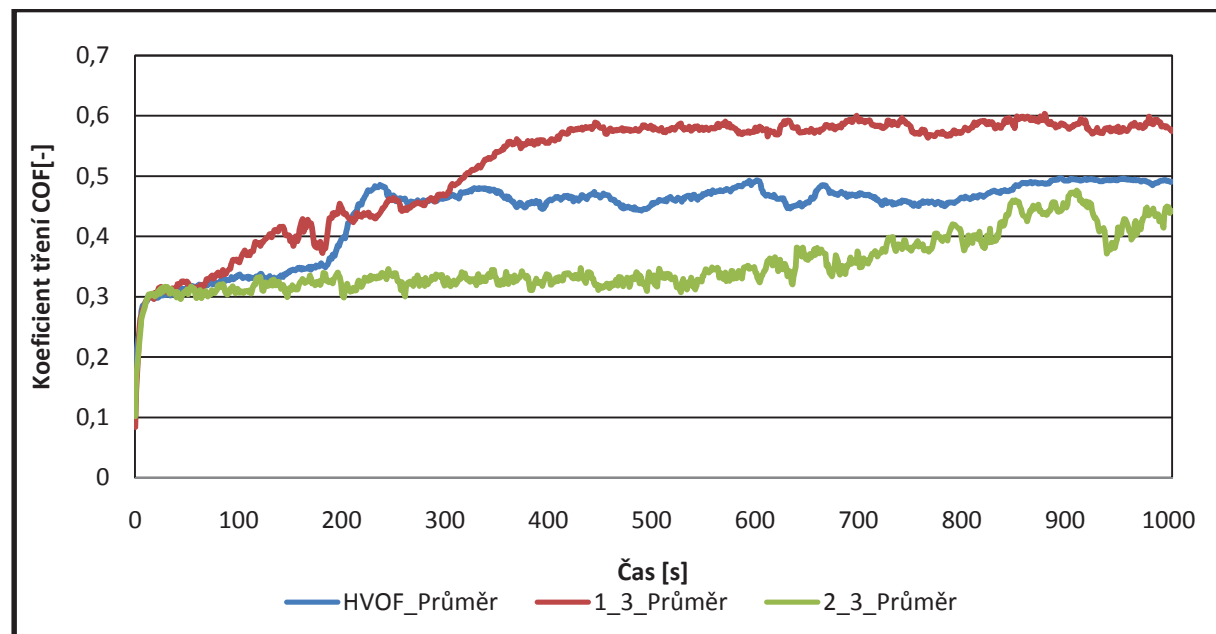
13.4 Porovnání hodnot výsledků měření odolnosti proti opotřebení

Porovnání průměrné hodnoty koeficientu tření a odebraného objemu materiálu při „Ball-on-Flat“ testu je v grafu níže (Graf 13:4). Na tomto grafu je patrné, že množství odebraného objemu se výrazně liší zejména pro částečně přetavený vzorek (parametry 1_3). Tento vzorek má 4x nižší množství odebraného objemu než zbývající dva vzorky. Tento vzorek má nejvyšší průměrnou hodnotu koeficientu tření COF.



Graf 13:4. Porovnání průměrné hodnoty koeficientu tření a odebraného objemu pro HVOF nástřik a vzorky po laserové modifikaci

Porovnání průběhu koeficientu tření v závislosti na čase pro jednotlivé vzorky je na grafu níže (Graf 13:5). Z grafu je patrné, že průběh koeficientu tření pro zcela přetavený vzorek (parametry 2_3) je pravděpodobně nejnižší po celou dobu testu a současně hodnota je téměř konstantní do hodnoty 600 sekund. Opačný případ nastává pro HVOF nástřik a částečně přetavený nástřik (dle parametrů 1_3), u kterých se koeficient pravděpodobně ustálí po určitém čase kolem hodnot 0,5 respektive 0,6.



Graf 13:5. Průběh koeficientu tření v závislosti na čase pro HVOF nástřik i pro nástřiky, které prošly laserovou modifikací

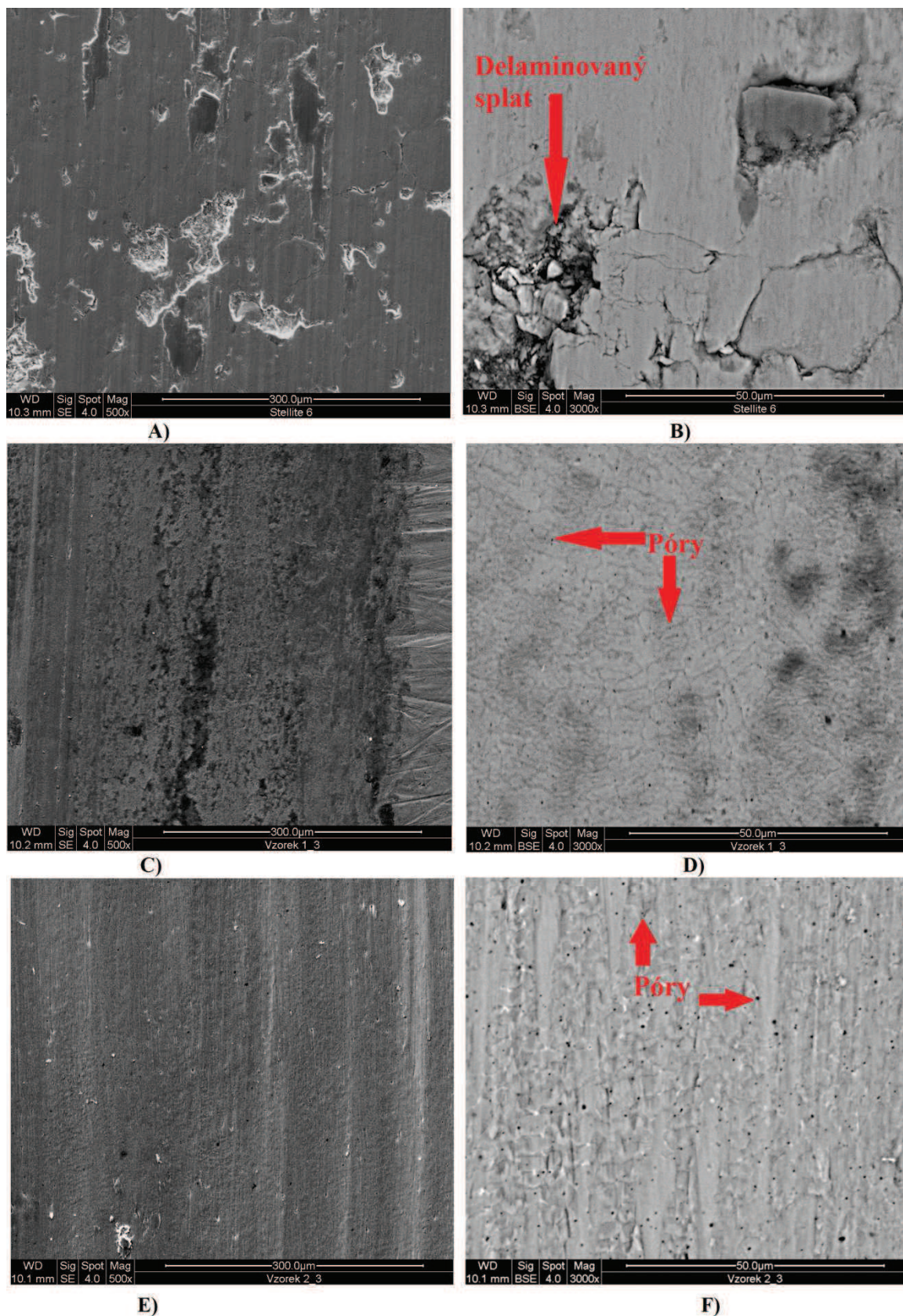
13.5 Studium mechanismu opotřebení

Na obrázku níže (Obrázek 13:2) jsou vyfoceny povrchy vzniklých stop při zkoušce opotřebení. Tyto snímky byly pořízeny na elektronovém mikroskopu při různém zvětšení a různých režimech pro odhalení mechanismu opotřebení jednotlivých vzorků.

Na snímku níže (Obrázek 13:2 – A) je zachycen povrch stopy HVOF nástřiku Stellite 6. Z tohoto obrázku lze rozpoznat, že dochází k delaminaci jednotlivých deformovaných částic nástřiku (splatů), což je spolu s plastickou deformací a rýhováním hlavním mechanismem opotřebení HVOF stříkaného povlaku Stellite 6. Částice uvolněné při delaminaci jsou při dalších cyklech testu deformovány a ulpívají jak ve stopě po opotřebení, tak na povrchu protikusů. Detailní snímek HVOF nástřiku lze pozorovat na obrázku níže (Obrázek 13:2 – B).

Částečně přetavený vzorek (dle parametrů 1_3) včetně detailu je zachycený na obrázku níže (Obrázek 13:2-C, D). Z tohoto snímku lze rozpoznat, že došlo ke změně mechanismu opotřebení. Na těchto snímcích už nejsou přítomny hluboké krátery vzniklé delaminací. Naopak lze na těchto snímcích pozorovat povrch vzniklý při plastické deformaci. Detailní snímek (Obrázek 13:2-D) odhaluje přítomnost určitého množství pórů na povrchu.

Zcela přetavený vzorek (dle parametrů 2_3) včetně detailu je zachycený na obrázku níže (Obrázek 13:2 – E, F). Dle těchto snímků, lze předpokládat, že povrch stopy vykazoval největší míru plastické deformace. Charakter stopy je zcela odlišný od nepřetaveného HVOF nástřiku Stellite 6. Detailní snímek (Obrázek 13:2 –F) odhaluje strukturu, která vykazuje prvky natažení. Taktéž lze rozpoznat největší množství pórů na povrchu stopy po opotřebení.



Obrázek 13:2. Povrch drážek vzniklých při zkoušce odolnosti proti opotřebení (A-HVOF nástřik, B-detail HVOF, C – částečně přetavený vzorek dle parametrů 1_3, D - detail vzorku 1_3, E – zcela přetavený vzorek dle parametrů 2_3, F– detail vzorku 2_3)

14 Diskuze výsledků

Byla vytvořena matice parametrů přetavení (viz. Tabulka 17) pro vytvoření dostatečného spektra vzorků. Základem pro výběr parametrů laserového přetavení pro následné vyhodnocovací metody bylo pozorování mikrostruktury v příčném řezu, charakteru povrchu a tloušťky HVOF nástřiku po laserové modifikaci (Tabulka 19). Obecně lze říci, čím vyšší je hustota energie (J/mm^2), tím je vyšší protavení a větší množství pórů v nástřiku. Čím vyšší je rychlost pohybu laseru tím je nižší míra protavení. Obdobných výsledků bylo dosaženo ve studiích zabývajících se přetavováním žárových nástřiků.[29],[30]

Pro další laserové přetavování a zkoumání byly vybrány vzorky, které měly odlišnou hloubku protavení. Důvodem bylo srovnání vlastností HVOF nástřiku a žárových nástřiků, které prošly různou laserovou modifikací. Tento postup byl obdobný postupu předešlých studií [29].

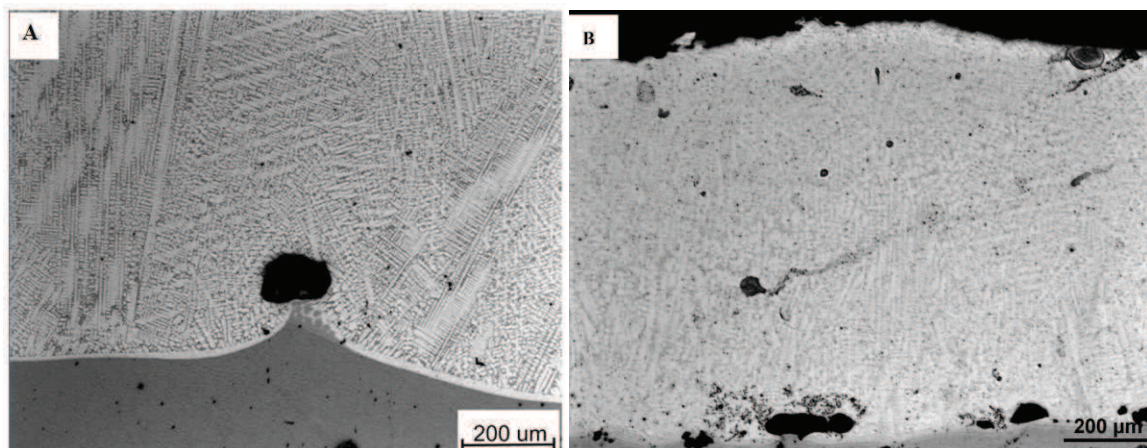
Vybraný zástupce zcela přetaveného HVOF nástřiku byl vzorek s označením 2_3 a jako zástupce částečně přetaveného HVOF nástřiku byl vybrán vzorek s označením 1_3. Parametry přetavení jsou v tabulce níže (Tabulka 29).

Vzorek	Výkon	Velikost Svazku X*Y		Energetická hustota	Rychlost pojezdu laseru
[-]	[W]	[mm]	[mm]	[J/mm^2]	cm/min
1_3	1070	12	1	21,39829	25,002
2_3	1070	12	1	42,80685	12,498

Tabulka 29. Parametry laserového přetavení vybrané pro další vyhodnocovací metody

Pozorování mikrostruktury vzorků odhalilo několik změn původního HVOF nástřiku Stellite 6, které byly způsobeny laserovou modifikací. Pro částečně přetavený vzorek (parametry 1_3) nedošlo k ovlivnění mezivrstvy mezi substrátem a nástřikem (Obrázek 9:2). Změna mezivrstvy byla naopak pozorována pro zcela přetavený nástřik (parametry 2_3, Obrázek 9:4). U těchto vzorků došlo ke snížení množství pórů na rozhraní.

Pro laserově modifikované vzorky byla pozorována změna mikrostruktury. Původní lamelární struktura HVOF nástřiku byla nahrazena jemnou dendritickou strukturou, která byla pozorována při laserovém navařování[31].



Obrázek 14:1. Snímky mikrostruktur vzniklých při laserovém navařování (obrázek A[31]) a HVOF nástřiku, který byl laserově přetaven (obrázek B)

Pro všechny vzorky, které byly laserově přetaveny, bylo charakteristické zvýšené množství pórů v nástřiku. Velikost těchto pórů v některých případech dosahovala až poloviny tloušťky nástřiku. Obdobné póry byly pozorovány též v laserově navařovaném povlaku na Stellite 6 [31]. Příčina vzniku těchto pórů není zcela jasná. Ve studii [31] byla jako příčina stanovena nevhodný tvar laserového paprsku, jehož energie byla na okrajích laserové stopy nižší. Další možnou příčinou by mohla být změna objemu materiálu při změně mikrostrukturního uspořádání ($hcc \times fcp$), která byla potvrzena pro HVOF nástřik a laserový návar. K obdobné transformaci by mohlo vzhledem k podobnosti struktur přetaveného a laserově navařeného povlaku docházet i v tomto případě.

Měření tvrdosti

Z hodnot měření tvrdosti je zcela patrná nehomogenita HVOF nástřiku, kde hodnoty kolísají v širokém rozsahu (Tabulka 21). Tento jev byl již pozorován v předešlých studiích (Rakhes, [29]). Tato nehomogenita je pravděpodobně způsobena defekty HVOF nástřiku, jako jsou nenatavené částice, póry nebo oxidické částice.

U laserově přetavených vzorků (parametry 1_3,2_3) došlo k výrazné homogenizaci struktury, což vedlo ke značnému snížení hodnoty směrodatné odchylky. Hodnoty naměřené tvrdosti byly v průměru jen nepatrně nižší než průměrná hodnota nepřetaveného HVOF nástřiku. Z výsledků lze předpokládat, že laserovým přetavením HVOF nástřiku nedojde k významnému poklesu tvrdosti, pouze dojde k homogenizaci natavené vrstvy a tím i hodnot tvrdosti. Porovnání profilů tvrdosti jednotlivých vzorků je zaznamenáno na grafu (Graf 10:4) a hodnoty jsou zaznamenány v tabulce níže (Tabulka 30). Snížení tvrdosti může být způsobeno také změnou vnitřního pnutí z tlakového – tahové.

Vzorek	Průměrná hodnota tvrdosti [HV03]
HVOF	369±76
Částečně přetavený (1_3)	359±12
Zcela přetavený (2_3)	338±11

Tabulka 30. Vyhodnocení měřené tvrdosti

Zbytková napětí

Zbytkové napětí bylo vyhodnoceno metodikou podle normy ASTM E837–08 za použití integrální metody. Měření bylo provedeno pro HVOF nástřik a vzorek, který byl částečně přetaven (dle parametrů 1_3).

Vyhodnocením zbytkových napětí odvrtačím metodou pro HVOF nástřik, byla zjištěna tlaková zbytková napětí, což by odpovídalo literatuře [12]. Vyhodnocením byla zjištěna tlaková napětí cca 60-120MPa. Napětí se pravděpodobně lineárně mění od povrchu až do vzdálenosti 0,1mm. Poté se mohou držet mezi hodnotami - 60 až - 80 MPa. (viz Obrázek 11:1). Rozložení vnitřních pnutí v žárově stříkaných povlacích, hodnocených pomocí odvrtačím metody, se ve své disertační práci zabýval Švantner [32]. Ačkoliv bylo jeho měření provedeno na jiných materiálech nástřiku, byla naměřené pnutí tlaková, což je v souladu s tímto měřením.

Pro vzorek, který byl částečně přetavený (dle parametrů 1_3), byla zjištěna tahová zbytková napětí, což je v přímém rozporu s měřením HVOF nástřiku bez přetavení. Je možné, že energie, která byla vložena laserovým přetavením, výrazně změnila rozložení zbytkových napětí. Materiál se zřejmě roztavil a při následném ochlazení došlo ke vzniku tahových napětí. Vyhodnocením byla zjištěna tahová napětí cca 400-500MPa. Napětí pravděpodobně lineárně

stoupá od povrchu až do vzdálenosti 0,15mm, poté se již ustálí na zmíněné hodnotě.(viz Obrázek 11:2).

Prvkové složení

Měření prvkového složení, pomocí EDX analýzy pro laserově přetavené vzorky, bylo provedeno na třech místech pro určení, zda došlo k promísení se substrátem a určení, v jaké hloubce k tomuto promísení došlo. Z výsledných hodnot jednotlivých měření prvkového složení je patrné, že pravděpodobně k žádnému promísení se substrátem nedochází (Tabulka 24). Hodnoty získané EDX analýzou odpovídaly hodnotám uváděných výrobcem[20].

Odolnost proti opotřebení

Měření odolnosti proti opotřebení probíhalo dle normy ASTM G-133-05 pro Lineární oscilační „Ball-on-Flat“ test. Z hodnot odebraného objemu materiálu v tabulce níže (Tabulka 31) je zřejmé, že množství odebraného objemu se výrazně liší zejména pro částečně přetavený vzorek (parametry 1_3). Tento vzorek má 4x nižší množství odebraného objemu než zbývající dva vzorky. Hodnoty zbylých vzorků se příliš neliší.

Vzorek	Odebraný objem materiálu [mm^3]	Koeficient tření COF [-]
HVOF	0,172±0,060	0,4406±0,0313
Částečně přetavený (1_3)	0,036±0,004	0,5181±0,0245
Zcela přetavený (2_3)	0,168±0,043	0,3534±0,0203

Tabulka 31. Porovnání odebraného objemu materiálu při zkoušce dle normy ASTM G-133-5 a průměrné hodnoty koeficientu tření

Vysvětlení tohoto jevu může být dáno charakterem opotřebení jednotlivých vzorků. Při opotřebení HVOF nástřiku dochází k delaminaci jednotlivých splatek. Tyto částice jsou vytrženy z žárového nástřiku a dále se podílejí na opotřebení [31]. Podobný charakter mechanismu opotřebení HVOF nástřiku, při kterém dochází k delaminaci, byl studován i pro slitiny na bázi železa [33].

Zajímavý je velice výrazný rozdíl mezi částečně přetaveným a zcela přetaveným vzorkem. Jak již bylo zmíněno, mikrostruktura zcela přetaveného vzorku je velice podobná laserově navařeným vzorkům (Obrázek 14:1). Lze tedy předpokládat i podobný mechanismus opotřebení, který byl publikován při studiu opotřebení laserově navařených vrstev [31]. V této studii je popsán charakter opotřebení laserově navařeného povlaku, při kterém nedochází k delaminaci celých částí povlaku, ale především k rýhování a plastické deformaci. Při procesu laserového navařování dochází k difúzi chromu na hranice dendridů, což vede k snížení tvrdosti a s ní související odolnosti proti opotřebení oproti HVOF nástřiku.

Při částečném přetavení (dle parametrů 1_3) došlo ke změně mikrostruktury, což možná zabránilo vytrhávání tvrdých částic žárového nástřiku a současně menší množství protavení nezpůsobilo difúzi chromu na hranice dendridů. Tento předpoklad nebyl potvrzen a bylo by vhodné učinit další vyhodnocení, které však už nebylo v časových možnostech práce.

Porovnání průběhu koeficientu tření v závislosti na čase pro jednotlivé vzorky je na grafu výše (Graf 13:5). Z grafu je patrné, že průběh koeficientu tření pro zcela přetavený vzorek (parametry 2_3) je pravděpodobně nejnižší po celou dobu testu a současně hodnota je téměř konstantní do hodnoty 600 sekund. Opačný případ nastává pro HVOF nástřik a částečně přetavený nástřik (dle parametrů 1_3), u kterých se koeficient pravděpodobně ustálí po určitém čase kolem hodnot 0,5 respektive 0,6. Průměrné hodnoty koeficientu tření jsou uvedeny v tabulce výše (Tabulka 31).

15 Závěr

V rámci zpracování této diplomové práce bylo vytvořeno široké spektrum přetavených vzorků dle různých parametrů. Pro další laserové přetavování a zkoumání byly však vybrány vzorky, které měly odlišnou hloubku protavení. Důvodem bylo srovnání vlastností HVOF nástřiku a žárových nástřiků, které prošly různou laserovou modifikací. Vybraný zástupce zcela přetaveného HVOF nástřiku byl vzorek s označením 2_3 a jako zástupce částečně přetaveného HVOF nástřiku byl vybrán vzorek s označením 1_3.

V důsledku použití laserového přetavení došlo ke změně orientace zbytkových napětí nástřiku. HVOF nástřik Stellite 6 vykazoval tlakové napětí, po přetavení se však pravděpodobně změnilo na tahové.

Z hlediska mechanických vlastností je částečné přetavení dle parametrů 1_3 nejvýhodnější. Při částečném přetavení došlo ke změně mikrostruktury povlaku a s ní spojené homogenizaci vlastností, snížení pórovitosti, zvýšení koheze, avšak zároveň došlo k nižší degradaci materiálu vlivem natavení a opětovné solidifikace spojené s precipitací tvrdých fází oproti zcela protavenému vzorku. Takto přetavený povlak má nižší rozptyl mechanických vlastností a výrazně vyšší odolnost proti opotřebení.

Problémem zůstává vznik velkých pórů – příčina jejich vzniku a možnost jejich eliminace při procesu přetavování bude předmětem dalšího výzkumu na pracovišti NTC ZČU. Souhrn všech výsledků měření a popisu mikrostruktury je v tabulce níže (Tabulka 32).

Vzorek	HVOF	Parametry 1_3	Parametry 2_3
Charakteristika	Žárový nástřik bez přetavení	Částečně přetavený nástřik	Zcela přetavený nástřik
Popis mikrostruktury a povrchu nástřiku	lamelární heterogenní struktura, malý obsah pórů v nástřiku, defekty na rozhraní nástřik-substrát, bez výrazných pórů na povrchu nástřiku	Částečné protavení nástřiku (cca ½), přítomny póry na rozhraní nástřik – substrát, póry na povrchu nástřiku	Zcela protavený nástřik, přítomny póry na rozhraní nástřik-substrát a také v nástřiku, póry na povrchu nástřiku
Prvkové složení	Stellite 6	Stellite 6 - beze změn	Stellite 6 - beze změn
Zbytková napětí	Tlakové	Tahové	Neurčeno
Tvrдость [HV03]	369±76	359±12	338±11
Odebraný objem při zkoušce odolnosti proti opotřebení [mm ³]	0,172±0,060	0,0355±0,0037	0,168±0,043
Koeficient tření [-]	0,4406±0,0313	0,5181±0,0245	0,3534±0,0203
Mechanismus opotřebení	Delaminace splatů	Plastický charakter stopy	Plastický charakter stopy

Tabulka 32. Souhrnná tabulka výsledků

16 Reference

17 Citovaná literatura

1. **Chen, H.** *Micro-scale abrasive wear behaviour of HVOF sprayed and laser remelted conventional and nanostructured WC-Co coatings.* 2005. *Wear.*
2. **Šulc, J.** *Lasery a jejich aplikace.* 2002.
3. **Lukáš, M.** Laserové diody - Princip funkce laserových diod. *www.elektrorevue.cz.* 2001/34, 2001, <http://www.elektrorevue.cz/clanky/01034/index.html>.
4. **Kannatey-Asibu, Jr, E.** *Principles of laser materials processing.* 2009. ISBN 978-0-470-17798-3.
5. **Mazumder, J.** *Journal of Metals.* 1983, Sv. Vol. 35.
6. **Ion, J. C.** *Laser Processing of Engineering Materials.* 2005. ISBN 0 7506 6079 1.
7. **Shiue, R. K. a Chen, C.** *Metallurgical Transactions.* 1992, Sv. Vol. 23A.
8. *www.emeraldinsight.com.* [Online] [Citace: 27. 11 2013.] http://www.emeraldinsight.com/content_images/fig/1560160403002.png.
9. **Jasim, K. M. a West, D.R. F.** *High Power Lasers and Laser Machining Technology.* 1989. *Spie* Vol. 1132.
10. **Pawlowski, L.** *The science and engineering of thermal spray coatings.* France : John Wiley & Sons, Ltd, 2008. ISBN: 978-0-471-49049-4.
11. **Houdková, Š., a další.** *Nanoindentační měření HVOF stříkaných povlaků.* 2011. 105. *Chemické listy.*
12. **Houdková, Š, Enžl, R. a Bláhová, O.** Žárové nástřiky. [Online] [Citace: 3. 28 2013.] <http://www.kmm.zcu.cz/CD/content/index.html>.
13. *Servis armatur spol. s.r.o. Servis Armatur.* [Online] [Citace: 28. 3 2013.] <http://www.servisarmatur.cz/index.php?page=high-velocity-spray>.
14. *www.ts-tech.cz.* [Online] [Citace: 28. 3 2013.] <http://www.ts-tech.cz/cz/menu4.htm>.
15. Výzkumný a zkušební ústav Plzeň s.r.o. *www.vzuplzen.cz.* [Online] [Citace: 28. 3 2013.] <http://www.vzuplzen.cz/zarove-nastriky/technologie.php#plamen>.
16. **Davis, J.R.** *Hand book of thermal spray technology.* USA : ASM International, 2004. ISBN 0-87170-795-0.
17. —. *ASM Specialty Handbook - Nickel, Cobalt, and Their Alloys.* USA : ASM International, 2000. ISBN: 0-87170-685-7.
18. *Institute Cobalt Development.* [Online] [Citace: 27. 11 2013.] <http://www.thecdi.com/index.php>.
19. **Betteridge, W.** *Cobalt and its Alloys.* USA : Horwood Limited, 1982. 978-0131401129.
20. *Sulzer Metco. Thermal Spray Materials Guide.* 2012.
21. **Schneider, M.** *Laser Cladding with Powder - Effect of some machining parameters on clad properties.* Enschede : Print Partners Ipskamp, 1998.
22. **Jäger, A. a Gärtnerová, V.** Fyzikální ústav akademie věd ČR. *Elektronovým mikroskopem do nitra materiálu aneb jak vypadá jejich struktura.* [Online] [Citace: 5. 3 2012.] <http://www.fzu.cz/popularizace/elektronovym-mikroskopem-do-nitra-materialu-aneb-jak->
23. **Jandoš, F., Říman, R. a Gemperle, A.** *Využití moderních laboratorních metod v metalografii.* Praha : SNTL Praha, 1985.
24. *Kovové materiály - Zkouška tvrdosti podle Vickerse - Část 1: Zkušební metoda EN ISO 6507-1.* Praha : Český normalizační institut, 2006.
25. **Václavík, J., a další.** *Aplikace vybraných metod pro měření zbytkového napětí.* Seč u Chrudimi : Czech Society for Nondestructive Testing, 2012.

26. *Standart Test Method for Linearly Reciprocating Ball-on-Flat sliding wear*. West Conshohocken : ASTM International, 2010. PA 19428-2959.
27. **Houdková, Š.** *Optimalizace parametrů nástřiku a depoziční vzdálenosti HVOF povlaku na bázi Stellite*. Plzeň : VZU Plzeň, duben 2013.
28. <http://www.stellite.com>. *Stellite 6 Alloy*. [Online] [Citace: 12. 4 2014.] stellite.co.uk/Portals/0/Stellite%206%20Final.pdf.
29. **Rakhes, M. M.** *Laser Surface Modification of HVOF Coatings for Improvement of Corrosion and Wear Performance*. Manchester : The University of Manchester, 2013.
30. **Vostřák, M., Hruška, M. a Houdková, Š.** *Laser re-melting of HVOF sprayed NiCrBSi coatings*. Brno : Metal 2013, Proceedings of 22nd international conference on metallurgy and materials, 2013.
31. **Houdková, Š., Smazalová, E. a Pála, Z.** *Porovnání technologie vysokorychlostního nástřiku plamenem a laserového navařování pro depozici povlaků na bázi Co*. Plzeň : NTC ZCU, květen 2014. NTC-VYZ-14-041.
32. **Švantner, M.** *Zjišťování zbytkových napětí ve vícevrstevných strukturách*. Plzeň : ZČU Plzeň, 2004.
33. **Bolelli, G., Bonferroni, B. a Laurila, J.** *Micromechanical properties and sliding wear behavior of HVOF-sprayed Fe-based alloy coatings*. 2012. *Wear* 276-277.

Seznam obrázků

Obrázek 3:1. Povrchové kalení laserem[5]	9
Obrázek 3:2. Závislost tvrdosti na vzdálenosti od povrchu při použití různých rychlostí pohybu laseru.	10
Obrázek 3:3. Ilustrace procesu laserového přetavení	12
Obrázek 3:4. Ilustrace metody laser cladding (a) předpřipravený přídavný materiál a (b) materiál přidáván v průběhu procesu [6].....	13
Obrázek 3:5. Schéma vzniklých oblastí materiálu při procesu laserového navařování[9]	14
Obrázek 4:1. Parametry žárových nástřiků a jejich vlastnosti[12].....	18
Obrázek 4:2. Schéma vysokorychlostního nástřiku HVOF (1. Přídavný materiál – prášek, 2. Přívod kerosinu, 3. Přívod kyslíku, 4. Nástřik, 5. Podklad, 6. Zapalovací svíčka)[13]	19
Obrázek 4:3. Vysokorychlostní nástřik HVOF [13]	19
Obrázek 4:4. Příklady použití HVOF technologie (A- Napínací stolík pásové brusky-povlak WC Co, B – dřík pístu ventilu-WCCrC NiCo, C- polygrafická válec – Cr_3C_2 [14].....	21
Obrázek 5:1. Závislost tvrdosti kobaltu na teplotě [19]	28
Obrázek 6:1. Typická velikost objektů, které lze pozorovat elektronovým mikroskopem. Pro srovnání je uveden i rozsah světelného mikroskopu.[22]	35
Obrázek 6:2. Schematická znázornění principu transmisního (vlevo) a řádkovacího (vpravo) elektronového mikroskopu.[22]	35
Obrázek 6:3. Měření tvrdosti dle Vickerse [24].....	36
Obrázek 7:1. Ocelový plech s naneseným žárovým nástřikem metodou HVOF před laserovou modifikací.....	38
Obrázek 8:1. Laserová modifikace povrchu (A- probíhající proces laserové modifikace, B- vzorek po provedení 4 laserových stop).....	39
Obrázek 8:2. Vzorky po laserové modifikaci při různých parametrech	40
Obrázek 8:3. HVOF nástřik Stellitu 6 přetaven při parametrech 1_1 (A-Makrosnímek laserové stopy, B- mikrostruktura v příčném řezu, C- struktura povrchu	40
Obrázek 8:4. HVOF nástřik Stellitu 6 přetaven při parametrech 1_6 (A-Makrosnímek laserové stopy, B- mikrostruktura v příčném řezu, C- struktura povrchu).....	41
Obrázek 9:1. Mikrostruktura HVOF nástřiku Stellitu 6 v příčném řezu (A- Obrázek nástřiku se substrátem, B- detailní snímek s popisem)	44
Obrázek 9:2. Mikrostruktura HVOF nástřiku Stellitu 6, který byl částečně přetaven dle parametrů 1_3, v příčném řezu (A- Obrázek nástřiku se substrátem, B- detailní snímek)	45
Obrázek 9:3. Mikrostruktura HVOF nástřiku Stellitu 6, který byl částečně přetaven dle parametrů 1_3, v příčném řezu (A- Obrázek překryvu laserových stop, B- snímek zachycující póry po přetavení)	46
Obrázek 9:4. Mikrostruktura HVOF nástřiku Stellitu 6, který byl zcela přetaven dle parametrů 2_3, v příčném řezu (A- Obrázek nástřiku se substrátem, B- detailní snímek překryvu laserových stop).....	46
Obrázek 10:1. Snímky zachycující měření tvrdosti jednotlivých vzorků (A- HVOF, B- částečně přetavený (1_3), C- zcela přetavený (2_3)).....	48
Obrázek 11:1. Uvolněné deformace a zbytková napětí v HVOF nástřiku.....	52
Obrázek 11:2. Uvolněné deformace a zbytková napětí HVOF nástřiku, který byl částečně přetaven	53
Obrázek 12:1. Měření prvkového složení pomocí EDX analýzy (vlevo 1_3, vpravo 2_3).....	54
Obrázek 13:1. Měření drážek opotřeby pomocí profilometru.....	55
Obrázek 13:2. Povrch drážek vzniklých při zkoušce odolnosti proti opotřeby (A- HVOF nástřik, B-detail HVOF, C – částečně přetavený vzorek dle parametrů 1_3, D - detail vzorku 1_3, E – zcela přetavený vzorek dle parametrů 2_3, F– detail vzorku 2_3).....	61

Obrázek 14:1. Snímky mikrostruktur vzniklých při laserovém navařování (obrázek A[31]) a HVOF nástřiku, který byl laserově přetaven (obrázek B)..... 62

Seznam grafů

Graf 10:1. Průběh tvrdosti na vzdálenosti od povrchu pro HVOF nástřik.....	49
Graf 10:2. Průběh tvrdosti na vzdálenosti od povrchu pro částečně přetavený vzorek (dle parametrů 1_3)	50
Graf 10:3. Průběh tvrdosti na vzdálenosti od povrchu pro zcela přetavený vzorek.....	50
Graf 10:4. Průběh tvrdosti na vzdálenosti od povrchu pro všechny vzorky	50
Graf 12:1. Srovnání prvkové složení pro jednotlivá měření	55
Graf 13:1. Průběh koeficientu tření v závislosti na čase pro HVOF nástřik.....	56
Graf 13:2. Průběh koeficientu tření v závislosti na čase pro částečně přetavený nástřik (dle parametrů 1_3)	57
Graf 13:3. Průběh koeficientu tření v závislosti na čase pro zcela přetavený nástřik (dle parametrů 2_3)	58
Graf 13:4. Porovnání průměrné hodnoty koeficientu tření a odebraného objemu pro HVOF nástřik a vzorky po laserové modifikaci	59
Graf 13:5. Průběh koeficientu tření v závislosti na čase pro HVOF nástřik i pro nástřiky, které prošly laserovou modifikací	59

Seznam tabulek

Tabulka 1. Aplikace povrchového kalení laserem v technické praxi[6]	11
Tabulka 2. Aplikace laserového přetavení v technické praxi[6]	12
Tabulka 3. Příklad procesních parametrů užívaných pro laserové navařování[4]	15
Tabulka 4. Aplikace laserového navařování v technické praxi[6]	16
Tabulka 5. Běžně používané organické těsnící látky včetně jejich charakteristiky[16]	24
Tabulka 6. Příklad slitin žárových nástřiků vhodných pro modifikaci tavením[16].....	26
Tabulka 7. Statistiky těžby a zpracování kobaltu v roce 2012[18]	27
Tabulka 8. Fyzikální konstanty čistého kobaltu [17],[18]	27
Tabulka 9. Mechanické vlastnosti vysoce čistého kobaltu za daného zpracování[17]	28
Tabulka 10. Slitiny kobaltu s vysokou odolností proti opotřebení[17].....	30
Tabulka 11. Slitiny kobaltu pracující za vysokých teplot, zpracované tvářením[17].....	31
Tabulka 12. Slitiny kobaltu pracující za vysokých teplot, slévárenské[17].....	31
Tabulka 13. Slitiny kobaltu s vysokou odolností proti korozi[17].....	32
Tabulka 14. Aplikace slitin na bázi kobaltu nanesených pomocí žárového nástřiku[10]	32
Tabulka 15. Kobaltové slitiny určené pro žárové nástřiky od firmy Sulzer Metco [20].....	33
Tabulka 16. Slitiny kobaltu nanesené metodou laserového navařování[21].....	34
Tabulka 17. Parametry HVOF žárového nástřiku Stellitu 6	38
Tabulka 18. Matice parametrů laserového přetavení	39
Tabulka 19. Popis charakteru struktury a povrchu HVOF nástřiku při různých parametrech přetavení	42
Tabulka 20. Tloušťka přetavené oblasti po laserové modifikaci	43
Tabulka 21. Naměřené hodnoty tvrdosti při nízkém zatížení pro jednotlivé vzorky.....	49
Tabulka 22. Informace o měření zbytkového napětí HVOF nástřiku	51

Tabulka 23. Informace o měření zbytkového napětí HVOF nástřiku, který byl částečně přetaven	53
Tabulka 24. Prvkové složení měřené pomocí EDX analýzy	54
Tabulka 25. Parametry zkoušky odolnosti proti opotřebení dle normy ASTM G-133-05"	55
Tabulka 26. Výsledné hodnoty měření opotřebení, měřené pomocí profilometru, pro HVOF nástřík	56
Tabulka 27. Výsledné hodnoty měření opotřebení, měřené pomocí profilometru, pro částečně přetavený nástřík (dle parametrů 1_3)	57
Tabulka 28. Výsledné hodnoty měření opotřebení, měřené pomocí profilometru, pro zcela přetavený nástřík (dle parametrů 2_3)	58
Tabulka 29. Parametry laserového přetavení vybrané pro další vyhodnocovací metody	62
Tabulka 30. Vyhodnocení měřené tvrdosti	63
Tabulka 31. Porovnání odebraného objemu materiálu při zkoušce dle normy ASTM G-133-5 a průměrné hodnoty koeficientu tření	64
Tabulka 32. Souhrnná tabulka výsledků	65