

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA STROJNÍ

Studijní program: N2301 Strojní inženýrství
Studijní obor: 3911T016 Materiálové inženýrství a strojírenská metalurgie

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Stanovení hlavních parametrů ovlivňujících přilnavost a odolnost povlaků
žárových nástřiků vytvořených elektrickým obloukem

Autor: **Bc. Martin Líbal**
Vedoucí práce: **Doc. Dr. Ing. Antonín Kříž**

Akademický rok 2012/2013

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: Bc. Martin LÍBAL
Osobní číslo: S11N0095P
Studijní program: N2301 Strojní inženýrství
Studijní obor: Materiálové inženýrství a strojírenská metalurgie
Název tématu: Stanovení hlavních parametrů ovlivňující přilnavost a odolnost povlaků žárových nástřiků vytvořených elektrickým obloukem
Zadávající katedra: Katedra materiálu a strojírenské metalurgie

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

1. Úvod do problematiky žárových nástřiků
2. Popis žárových nástřiků, průmyslová aplikace, typy přídavných materiálů
3. Popis zařízení, mechanické zkoušky, výtahy z norem atd.
4. Experimentální část - příprava vzorků, popis parametrů a provedení vlastních zkoušek
5. Vyhodnocení výsledků, diskuse výsledků
6. Závěr

Rozsah grafických prací: fotodokumentace, obrázky

Rozsah pracovní zprávy: 50-70 stran

Forma zpracování diplomové práce: tištěná/elektronická

Seznam odborné literatury:

- Ambrož, O., Kašpar, J.: Žárové nástřiky a jejich průmyslové využití. 1. vydání Praha SNTL, 1990, 320 s., ISBN 80-03-00347-4
- Matejka, D., Benko, B.: Plazmové striekanie kovových a keramických práškov. 1. vydání Bratislava Alfa, 1988, 272 s., ISBN 063-062-87
- Enžl, R.: Vysokorychlostní nástřik povlaků na bázi karbidu wolframu, disertační práce, ZČU v Plzni, FAV- KFY, 1999
- Firemní prospekty a manuály
- Aktuální literární publikace v časopisech a sbornících

Vedoucí diplomové práce:

Doc. Dr. Ing. Antonín Kříž

Katedra materiálu a strojírenské metalurgie

Konzultant diplomové práce:

Ing. Václav Kaška


BIS Czech, s. r. o.

Datum zadání diplomové práce: **24. září 2012**

Termín odevzdání diplomové práce: **24. května 2013**


Doc. Ing. Jiří Staněk, CSc.
děkan




Prof. Ing. Yáclav Mentl, CSc.
vedoucí katedry

V Plzni dne 24. září 2012

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

Autorská práva

Podle Zákona o právu autorském. č.35/1965 Sb. (175/1996 Sb. ČR) § 17 a Zákona o vysokých školách č. 111/1998 Sb. je využití a společenské uplatnění výsledků diplomové práce, včetně uváděných vědeckých a výrobně-technických poznatků nebo jakékoliv nakládání s nimi možné pouze na základě autorské smlouvy za souhlasu autora a Fakulty strojní Západočeské univerzity v Plzni.

ANOTAČNÍ LIST DIPLOMOVÉ (BAKALÁŘSKÉ) PRÁCE

AUTOR	Příjmení Bc. Líbal	Jméno Martin	
STUDIJNÍ OBOR	3911T016 Materiálové inženýrství a strojírenská metalurgie		
VEDOUCÍ PRÁCE	Příjmení (včetně titulů) Doc. Dr. Ing. Kříž	Jméno Antonín	
PRACOVNÍŠTĚ	ZČU - FST - KMM		
DRUH PRÁCE	DIPLOMOVÁ	BAKALÁŘSKÁ	Nehodící se škrtněte
NÁZEV PRÁCE	Stanovení hlavních parametrů ovlivňujících přilnavost a odolnost povlaků žárových nástřiků vytvořených elektrickým obloukem		

FAKULTA	strojí	KATEDRA	KMM	ROK ODEVZD.	2013
----------------	--------	----------------	-----	------------------------	------

POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

CELKEM	78	TEXTOVÁ ČÁST	55	GRAFICKÁ ČÁST	23
---------------	----	---------------------	----	--------------------------	----

<p style="text-align: center;">STRUČNÝ POPIS (MAX 10 ŘÁDEK)</p> <p>ZAMĚŘENÍ, TÉMA, CÍL POZNATKY A PŘÍNOSY</p>	<p>Cílem této diplomové práce je vyhodnotit tloušťky vrstev přídavných materiálů vytvořených elektrickým obloukem na zařízení OSU G30/4, které je ještě možné na strojní součásti nanášet, aniž by došlo ke snížení funkčnosti povlaků. V teoretické části jsou popsány nejčastěji používané renovační technologie, struktura a vlastnosti žárových nástřiků, metody vytváření povlaku žárovým nástřikem, technologický postup vytváření žárových nástřiků a druhy přídavných materiálů. V praktické části jsou nejvhodnějšími metodami hodnoceny tři typy přídavných materiálů o různých tloušťkách. Hodnocení adhezivní pevnosti se provedlo pomocí tahové zkoušky, odolnost proti opotřebení byla vyhodnocena metodou Dry Sand/Rubber Wheel test. Dále byla naměřena tvrdost vrstev, mikrotvrdost a pórovitost.</p>
<p style="text-align: center;">KLÍČOVÁ SLOVA</p>	<p style="text-align: center;">Renovace, žárové nástřiky, vlastnosti povlaků, zkouška přilnavosti, Dry Sand/Rubber Wheel test, opotřebení</p>

SUMMARY OF DIPLOMA (BACHELOR) SHEET

AUTHOR	Surname Bc. Líbal	Name Martin	
FIELD OF STUDY	3911T016 Materials Engineering and Engineering Metallurgy		
SUPERVISOR	Surname (Inclusive of Degrees) Doc. Dr. Ing. Kříž	Name Antonín	
INSTITUTION	ZČU - FST - KMM		
TYPE OF WORK	DIPLOMA	BACHELOR	Delete when not applicable
TITLE OF THE WORK	Determination of the main parameters influencing the adhesion and durability thermally sprayed coatings created by an electric arc		

FACULTY	Mechanical Engineering	DEPARTMENT	KMM	SUBMITTED IN	2013
----------------	------------------------	-------------------	-----	---------------------	------

NUMBER OF PAGES (A4 and eq. A4)

TOTALLY	78	TEXT PART	55	GRAPHICAL PART	23
----------------	----	------------------	----	-----------------------	----

BRIEF DESCRIPTION TOPIC, GOAL, RESULTS AND CONTRIBUTIONS	The aim of diploma thesis is to evaluate the thicknesses of the layers of additional materials created by an electric arc on the device OSU G30/4, which is still possible to apply on machine parts, without reducing the functionality of the coatings. In the theoretical part are describes the most commonly used renovation technology, structure and properties of thermally sprayed coatings, methods of creating thermal spraying, technological process of creating thermally sprayed coatings and types of additional materials. In the practical part, are the most appropriate methods evaluated three types of additional materials of different thicknesses. Evaluating of adhesive strength was performed using tensile test, the wear resistance was evaluated by Dry Sand/Rubber Wheel test. Furthermore, was measured the hardness of layers, microhardness and porosity.
KEY WORDS	Renovation, thermal spraying, coating properties, adhesion test, Dry Sand / Rubber Wheel test, wear

Poděkování

Chtěl bych poděkovat vedoucímu diplomové práce Doc. Dr. Ing. Antonínu Křížovi za konzultace, které mi pomohly při řešení diplomové práce. Dále bych chtěl poděkovat Ing. Václavu Kaškovi za to, že mi poskytl cennou praxi ve firmě BIS Czech s.r.o. a umožnil mi vypracovat tuto diplomovou práci. Také bych chtěl poděkovat dalším lidem z firmy, které mi poskytli zkušební vzorky a všem lidem, kteří mi při řešení diplomové práce pomáhali. Rovněž bych chtěl poděkovat i své rodině a přítelkyni za podporu.

Tato diplomová práce vznikla za podpory projektů ESF OP VpK. Realizace projektu „Systém vzdělávání pro personální zabezpečení výzkumu a vývoje v oblasti moderního trendu povrchového inženýrství - integrity povrchu - CZ.1.07/2.3.00/20.0037“ umožnila konzultace s předními odborníky z oblasti povrchového inženýrství. Projekt „Posílení spolupráce mezi vysokými školami, výzkumnými ústavami a průmyslovými partnery v Plzeňském kraji - CZ.1.07/2.4.00/17.0052“ napomohl při propojení výstupů diplomové práce s aplikačním a akademickým prostředím. Diplomová práce byla realizována na základě řešeného studentského projektu SGS – 2012-044 „Aplikace progresivních vrstev na rezné nástroje s důrazem na integritu obrobeného povrchu a rezné hrany“.

Obsah

1	Úvod.....	10
I.	TEORETICKÁ ČÁST.....	11
2	Renovace strojních dílů.....	12
3	Metody renovací.....	12
3.1	Renovace součástí na rozměry původní.....	13
3.1.1	Navařování.....	13
3.1.2	Žárové nástřiky.....	13
4	Princip vytváření žárových nástřiků.....	14
5	Struktura žárového nástřiku.....	15
5.1	Oxidické vměstky.....	16
5.2	Pórovitost.....	16
6	Vlastnosti žárového nástřiku.....	17
6.1	Přilnavost.....	17
6.2	Tvrдост.....	18
6.3	Tření.....	18
6.4	Opotřebenění.....	19
7	Metody žárových nástřiků.....	21
7.1	Metody, které využívají tepelnou energii hoření směsi paliva a kyslíku.....	22
7.1.1	Nástřik plamenem.....	22
7.1.2	Vysokorychlostní nástřik plamenem - HVOF.....	25
7.2	Metody, které využívají tepelnou energii elektrického zdroje.....	27
7.2.1	Nástřik elektrickým obloukem.....	27
7.3	Moderní metody žárových nástřiků.....	29
7.3.1	Nástřik studeným plynem (The Cold Spray Process).....	30
7.3.2	Vysokofrekvenční indukční žárový nástřik.....	31
7.4	Porovnání jednotlivých metod žárových nástřiků.....	31
8	Průběh renovace.....	33
8.1	Příprava povrchu základního materiálu.....	33
8.1.1	Vstupní kontrola.....	33
8.1.2	Čištění povrchu.....	33
8.1.3	Krytování strojních částí.....	33
8.1.4	Otryskávání.....	34
8.2	Vlastní nástřik.....	35
8.3	Opracování nástřiku na požadované konečné rozměry součásti.....	35
9	Typy přídavných materiálů.....	35
9.1	Rozdělení přídavných materiálů podle jejich tvaru.....	36

9.1.1	Přídavné materiály v podobě prášku	36
9.1.2	Přídavné materiály v podobě drátu.....	36
9.2	Rozdělení přídavných materiálů podle chemického složení.....	37
9.2.1	Kovové přídavné materiály.....	37
9.2.2	Keramické přídavné materiály	37
9.2.3	Speciální druhy přídavných materiálů.....	38
II.	PRAKTICKÁ ČÁST.....	39
10	Představení společnosti BIS Czech s.r.o.	40
11	Popis experimentu	40
11.1	Zařízení pro nástřik elektrickým obloukem OSU G 30/4-LD/U2.....	41
11.2	Použité přídavné materiály.....	42
11.3	Příprava zkušebních vzorků	43
11.4	Metalografická příprava	45
12	Metody hodnocení žárových nástřiků.....	46
12.1	Hodnocení mikrostruktury povlaků	46
12.1.1	Vyhodnocení mikrostruktury.....	47
12.1.2	Vyhodnocení pórovitosti povlaků	52
12.2	Hodnocení abrazivní odolnosti materiálu	53
12.2.1	Metoda Dry Sand/Rubber Wheel test.....	53
12.2.1.1	Vyhodnocení metody Dry Sand/Rubber Wheel test	54
12.2.2	Metoda PIN-on-DISC.....	57
12.2.2.1	Vyhodnocení metody PIN-on-DISC	58
12.3	Zkouška tvrdosti	59
12.3.1	Vyhodnocení tvrdosti	59
12.4	Zkouška mikrotvrdosti	60
12.4.1	Vyhodnocení mikrotvrdosti	61
12.5	Hodnocení adhezivní pevnosti	63
12.5.1	Vyhodnocení adhezivní pevnosti	64
13	Diskuze výsledků.....	68
14	Závěr	72
	Seznam použité literatury	73
	Seznam obrázků	75
	Seznam tabulek	77
	Seznam grafů.....	78

1 Úvod

Strojní součásti jsou v technické praxi namáhány různými provozními podmínkami (přenášející síly, tlaky, rázy, teplota, okolní prostředí, atd.). Působením těchto vlivů dochází u strojů a jejich součástí k namáhání, které způsobuje různé intenzivní poškození povrchů strojních součástí (opotřebením, deformace, koroze, trhliny, lomy, otláčení). Aby nedocházelo k výraznému poškozování povrchů strojních součástí, byly postupně vyvíjeny různé metody vytvářející na součástech ochranné vrstvy, které jsou proti provozním podmínkám odolné. K takovýmto metodám patří i progresivní metoda vytváření žárových nástřiků. Vrstvy vytvořené žárovými nástřiky našly své uplatnění v mnoha průmyslových odvětvích. Používají se zejména v automobilovém, leteckém, petrochemickém, papírenském, lékařském, energetickém, strojírenském, zpracovatelském a těžebním průmyslu.

K depozici žárových nástřiků byly vyvinuty různé technologie, které mají na výsledné vlastnosti povrchů součástí různý ochranný charakter. Metody vytváření žárových nástřiků se rozdělují do dvou hlavních skupin: Metody využívající k natavení přídavného materiálu spalovací proces a metody využívající k natavení přídavného materiálu tepelnou energii elektrického zdroje. Metody žárových nástřiků jsou však i nadále vyvíjeny. Mezi poměrně novou metodu vytváření nástřiků patří například metoda nástřiku studeným plynem.

Povlaky vytvořené žárovými nástřiky zvyšují životnost, bezpečnost a spolehlivost strojních součástí. Používají se jak při výrobě nových součástí tak v oblasti renovací. Jejich velká výhoda spočívá v tom, že vhodnou optimalizací procesních parametrů a správnou volbou přídavného materiálu dosáhneme právě takových vlastností, které zákazník vyžaduje. Rozmanitost technologie žárových nástřiků poskytuje četné množství různých aplikací. Například pokud je u strojních součástí vyžadován povlak s vysokou mírou pórovitosti, nastaví se procesní parametry nástřiku tak, aby vytvořený povlak tyto požadované podmínky splňoval. Takovéto povlaky se používají například u samomazných výstřek ložisek nebo jako tepelné bariéry v automobilovém a leteckém průmyslu. Mezi další výhodu žárových nástřiků patří snižování nákladů. Proto jsou v současné době technologie tohoto typu velice oblíbené a dostavilo se jim i poměrně velkého rozmachu.

Ve firmě, která je zadavatelem této diplomové práce, se potýkají s následujícím problémem: Značně opotřebované strojní součásti (úbytek materiálu od 1,5mm výše) jsou renovovány navařováním. Navařovat určité materiály je však mnohdy obtížné vzhledem k tomu, že jsou některé součásti náchylné na vnesené teplo a také povrchy vytvořené navařováním nemají takové dobré funkční vlastnosti, jako v případě použití žárových nástřiků. Z tohoto důvodu je hlavním cílem diplomové práce vyhodnotit tloušťky vrstev vytvořených žárovými nástřiky, které je ještě možné na základní materiál nanášet, aniž by docházelo ke snížení funkčnosti povlaků. V teoretické části diplomové práce je vypracována literární rešerše, kde jsou zmíněny nejčastěji používané renovační technologie, popsány jednotlivé metody vytváření žárových nástřiků a jejich principy, struktura a vlastnosti žárových nástřiků. Dále je popsán průběh celé renovace. V závěru teoretické části jsou popsány přídavné materiály, kterými jsou žárové nástřiky vytvářeny. V praktické části budou provedeny nejvhodnější metody měření, pomocí nichž budeme schopni vyhodnotit, v jakých tloušťkách mohou být vrstvy nanášeny, aby nebyly ovlivněny mechanické vlastnosti vytvořených vrstev. Na zkušební vzorky budou nanášeny tři typy přídavných materiálů o různých tloušťkách. Hodnocení bude provedeno především pomocí tahové zkoušky, podle níž získáme informace o adhezivní pevnosti mezi základním materiálem a vytvořeným povlakem. Dále bude provedeno měření pomocí metody Dry Sand/Rubber Wheel test a metody PIN-on-DISK. Díky těmto měření bude stanovena odolnost proti abrazivnímu opotřebením vytvořených vrstev. Také bude vyhodnocena mikrostruktura a pórovitost povlaků, povrchová tvrdost povlaků a mikrotvrdost v příčných řezech HV0,3.

I. TEORETICKÁ ČÁST

2 Renovace strojních dílů

Firma BIS Czech s.r.o. se kromě jiných produktů a služeb, které nabízí, zabývá také renovací strojních součástí. Pojem renovace se v běžném životě poměrně často používá ve smyslu zlepšení nějakého objektu, např. renovace automobilu, bytu apod. Ve strojírenství tento pojem znamená opravu poškozené strojní součásti. Renovace umožňují součástem obnovit popř. výrazně zlepšit jejich funkční vlastnosti a navrátit jim původní geometrii.

Renovace se provádějí z tvarového hlediska, což znamená např. oprava ulomených částí nebo doplnění opotřebovaného povrchu. Z funkčního hlediska, tím se zvýší třecí vlastnosti, odolnosti proti opotřebení a vysokým teplotám. Také je zapotřebí zmínit hledisko provozní, kdy nesmí dojít k destrukci při dlouhodobém zatížení u opravené součásti. [1], [2]

Renovační technologie jsou známy několik desítek let a jsou stále vyvíjeny a zdokonalovány. Jejich výhodou spočívá v tom, že se opraví pouze ta část strojní součásti, která se opotřebovala a ztratila svou funkčnost. Proto není zapotřebí vyřazovat součást z provozu a nakupovat či vyrábět součást novou. Mezi nejčastější příčiny, kdy jsou z provozu vyřazeny opotřebované strojní součásti, patří poškození povrchu. Zvýšení životnosti opravených součástí ve srovnání s novými je další z výhod renovačních technologií.

Moderní metody renovačních technologií umožňují opravit a svařovat materiály, které se dříve nedaly svařit vůbec nebo jen velice obtížně. V současnosti je možné svařovat např. litinové díly, odlitky z hliníku, barevné kovy, navařovat materiály odolné proti opotřebení, otěruvzdorné materiály, nerezavějící oceli, atd.

Renovace mají širokou škálu možností použití. Používají se např. jako uložení pro ložiska, spojky, rotory elektromotorů, šnekové hřídele, hřídele čerpadel, pístnice hydraulických válců, peletizační desky atd. Touto širokou nabídkou možností renovací lze v mnoha případech prodloužit životnost stroje. [1], [2]

3 Metody renovací

Renovace lze provádět různými způsoby. Při výběru nejvhodnější metody renovace je nutné zohlednit výsledné vlastnosti renovované součásti a provozní podmínky. Dále je potřeba uvažovat technologické možnosti uvažovaného způsobu renovace. Rozhodnutí o využití či nevyužití opravované součásti by mělo vycházet z technologického způsobu renovace. Také je zapotřebí uvažovat i ekonomické následky vybrané technologie renovace.

Jednotlivé způsoby renovací se rozdělují podle charakteru hlavní operace technologického postupu: [3]

- Renovace opotřebovaných součástí opracováním na opravné rozměry (obnova válcových ploch a ploch se závity)
- Renovace opotřebovaných součástí na rozměry původní (navarováním, pokovováním, nanášením plastických kovů, plastickou deformací, ostatními způsoby)
- Renovace deformovaných součástí (rovnání za tepla, za studena, místním povrchovým ohřevem, povrchovým náklepem)
- Renovace součástí s trhlinami a lomy (svarování, metoda Metallock, záplata)
- Renovace jinak poškozených součástí [3]

Vzhledem k tomu, že existuje celá řada renovačních technologií, jsou zde uvedeny pouze ty metody, které se ve firmě BIS Czech s.r.o. využívají nejčastěji.

3.1 Renovace součástí na rozměry původní

Pod pojmem renovace na původní rozměr se rozumí navařování, pokovování, mechanické způsoby renovace, metalizace, nanášení plastů a plastická deformace.

3.1.1 Navařování

Při navařování je na upravovaný povrch základního materiálu nanášena vrstva kovu, které se říká návar. Metody, které se při tomto způsobu používají, jsou podobné metodám stejným jako při svařování. Princip navařování je obdobný jako při svařování. Spočívá v roztavení a přilnutí přídatného materiálu na základní materiál, na rozdíl od svařování, kdy dochází k vytvoření trvalého nerozebíratelného spoje dvou a více součástí. Za návar lze považovat i první housenku, kterou svářeč vyrobí.

Navařování je jednou z nejvíce používaných metod při opravě mechanicky opotřebovaných součástí. Po renovaci získají opotřebované součásti původní rozměr, tvar i funkční vlastnosti. Kromě běžných vrstev se navařují také speciální vrstvy, které jsou odolné proti erozi, abrazi, kavitaci, teplotě, atd. Tyto vrstvy se používají např. při navařování částí dopravníků, zubů bagrů, hřídelí, v běžném užití se navařování používá při opravě temen kolejnic městských drah. [4]

Mezi nejvíce používané technologické způsoby při navařování patří:

- plamenem
- elektrickým obloukem
- ruční obalenou elektrodou
- v ochranných plynech MIG/MAG, WIG
- pod tavidlem drátovou nebo páskovou elektrodou
- plazmou a mikro plazmou
- laserem
- hybridní – za použití laseru a obloukového svařování MIG/MAG
- elektro vibrační navařování
- elektro kontaktní navařování [4]

3.1.2 Žárové nástřiky

Tento moderní způsob renovace strojních dílů umožňuje navrátit součásti původní geometrii a získat tak výrazně lepší funkční vlastnosti. Technologie, kterými se žárové nástřiky vytvářejí, vedou ke kvalitní, rychlé a tedy i ekonomicky výhodné opravě poškozeného povrchu strojních součástí. Renovované součásti mají delší životnost, lepší bezpečnost a spolehlivost. [5]

Povlaky vytvořené žárovými nástřiky dosahují tloušťky vrstev od 50 μm maximálně do 2mm, výjimečně až 3mm. Tyto povlaky se používají k ochraně povrchu i jako funkční povlaky, které jsou jinou možností využití mezi tenkými vrstvami a objemovými materiály. Nanesením materiálu na základní materiál dochází ke zvýšení tvrdosti povrchu oproti základnímu materiálu a to až o 40%. Vrstvy dosahují pevnosti v tlaku až 1200 MPa. Kromě vysokých hodnot tvrdosti, mají vrstvy i značnou křehkost, což je omezuje používat jen tam, kde nedochází k rázovému nebo cyklickému namáhání. [5]

Vrstvy vytvořené žárovými nástřiky splňují následující užité vlastnosti:

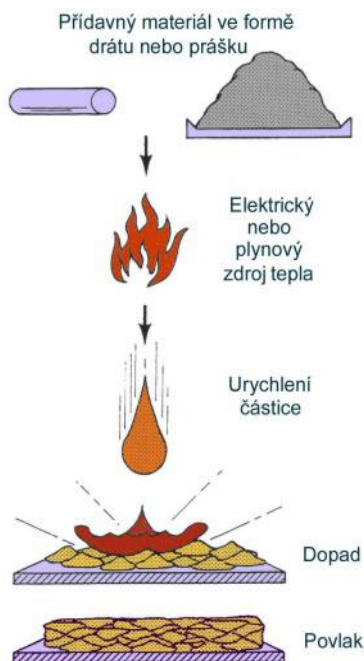
- odolnost proti mechanickému opotřebení (abraze, eroze, kavitace)
- vynikající tribologické vlastnosti (samomazné, kluzné, těsnící povlaky)
- odolnost proti oxidaci, korozi a proti působení agresivního chemického prostředí
- odolnost proti extrémně vysokým teplotám
- doplnění rozměrů, doplnění chybějícího materiálu
- elektroizolační a elektro vodivé povlaky
- biokompatibilní, zdravotně nezávadné povlaky
- povlaky se speciálními fyzikálními vlastnostmi (supravodivost, optika, odolnost proti záření, iontově reagující povlaky)
- dekorativní povlaky [5]

Povlaky, které jsou vytvářeny žárovými nástřiky, je možné aplikovat na všechny běžné konstrukční materiály (slitiny železných i neželezných kovů), dále pak i na jiné materiály, jakou jsou např. dřevo, papír, sádra, plastické hmoty, sklo, keramika, tkanina atd. [6] Naopak vrstvy nejdou nanášet na součásti, které byly upraveny povrchovou úpravou chromováním nebo na nitrídané vrstvy. Chemické složení základního materiálu renovované součásti nehraje roli při nanášení materiálů během žárového nástřiku. Vzhledem k tomu, že se práce zabývá pouze hodnocením vrstev vytvořených žárovými nástřiky, bude dále zmiňována jen tato technologie.

4 Princip vytváření žárových nástřiků

Princip vytváření žárových nástřiků spočívá ve vytvoření nové vrstvy na původním povrchu a to tak, že se do zařízení přivede materiál, který bude nanášen buďto ve formě prášku nebo drátu (viz obr. č. 1). Jako polotovaru pro žárové stříkání se častěji používá drátu, který je dobře tvářitelný a má nižší teplotu tání. Prášky se používají méně často. V zařízení se prášek nataví a urychlí se proudem vzduchu nebo spalín na základní povrch renovované součásti. Po dopadu na základní materiál se urychlená částice rozptýlí po ploše a dojde k utužení a k mechanickému ukotvení. Povlak je tvořen typickou lamelární strukturou se speciálními vlastnostmi.

Jako zdroj energie, který je nutný k natavení stříkaného kovu se používá buďto plynový zdroj tepla nebo elektrická energie. Nejvíce se používá nástřik pomocí kyslíko-acetylenovým plamenem nebo elektrickým obloukem. Méně často se pak objevují plazmové technologie, které se používají na keramické a kovokeramické povlaky, neboť vysoká teplota plazmatu umožňuje roztavit látky s vysokou teplotou tání. [5]

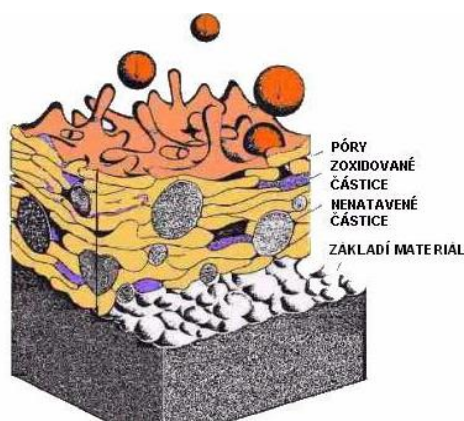


Obr. 1: Podstata vytváření žárových nástřiků [5]

Jak už bylo uvedeno, žárové nástřiky se dají nanášet téměř na všechny typy základních materiálů. Avšak povlaky se mohou vytvářet pouze z těch materiálů, kde nedochází k rozpadu pod bodem tání. Kvalita žárového nástřiku závisí především na kvalitě spojení mezi oběma vrstvami materiálů. Proto je zapotřebí, aby se částice roztaveného kovu povlaku mechanicky zakotvily na povrchu základního materiálu. Důležitým procesem před vytvářením žárového povlaku je kvalitní příprava povrchu, potom následuje vlastní žárový nástřik a následná úprava a ošetření nastříkané vrstvy. Před žárovým stříkáním musí být povrch zbaven všech mastnot a nečistot a také musí být zdrsňen. To se provádí buďto chemicky nebo mechanicky. Samotné stříkání roztaveného kovu se provádí pomocí elektrické pistole. Po nanesení polotovaru na základní materiál, se musí povrch brousit, popř. soustružit na požadovanou drsnost. Při kontaktu rozžhaveného kovu se základním materiálem nedochází k nežádoucím deformacím, neboť teplota povlakované součásti se pohybuje od 80 do 120°C, což je pod teplotou fázově-strukturních přeměn. [5], [7]

5 Struktura žárového nástřiku

Povlaky vytvořené jakoukoliv technologií žárového nástřiku jsou tvořeny lamelární strukturou. Struktura je kromě splatů, (což jsou deformované natavené částice) tvořena také nenatavenými popř. jen částečně natavenými částicemi, oxidickými částicemi a póry (viz obr. č. 2). Při dopadu urychlených natavených částic na podkladový materiál dochází vlivem vysoké rychlosti ochlazování částic ke krystalizaci zrn. Vysoká rychlost ochlazování natavených částic také zabraňuje segregaci rovnovážných fází. Struktura povlaku je kromě oxidů velice homogenní. Nastavením hlavních parametrů žárového nástřiku je ovlivněna pórovitost i obsah oxidů ve struktuře povlaku. [5]



Obr. 2: Schéma struktury žárového nástřiku [5]

5.1 Oxidické vměstky

Obsah oxidů ve struktuře je jedním z hlavních faktorů ovlivňující výsledné vlastnosti povlaku. Oxidické vměstky ve struktuře kovového povlaku zvyšují tvrdost vrstev. V příčném výbrusu je poznáme tak, že mají podlouhlé tmavé tvary. Nicméně jejich nadměrné množství způsobuje zvýšení křehkosti povlaku. Také může docházet ke snížení soudržnosti povlaku, pokud se oxidy hromadí na jediném místě. [5]

Ve struktuře vznikají oxidické částice dvěma následujícími způsoby:

1. Oxidické vměstky vznikají působením vysoké teploty na povrchu vrstvy
2. Oxidické vměstky vznikají vzájemným působením letící roztavené částice s okolní atmosférou

Množství oxidů ve struktuře vytvořených vrstev se eliminuje nastavením vhodných procesních parametrů:

- Zabránění interakce natavených částic s kyslíkem - snížíme nástřikem v ochranné atmosféře inertních plynů
- Zkrácení času setrvání částic v plamenu - snížíme vzdáleností mezi povrchem a tryskou
- Snížením teploty povrchu nástřiku
- Použitím vhodnější velikosti částic prášku [5]

5.2 Pórovitost

Porozita má stejně jako obsah oxidických vměstků ve struktuře kovového povlaku značný podíl na výsledné vlastnosti žárově stříkaných povlaků. Obecně pórovitost zhoršuje kvalitu a snižuje tvrdost povrchu. Vysoký počet nenatavených nebo špatně natavených částic a nízká hodnota soudržnosti je spojována s odlupováním či praskáním vrstev, což je způsobené vysokou pórovitostí ve struktuře povlaku. Pórovitost povrchu přesahující 10% usnadňuje korozi popř. oxidaci substrátu, neboť malé póry tvoří průchozí kanály mezi povlakem a základním materiálem.

Jak již bylo uvedeno, pórovitost zhoršuje vlastnosti povlaků. Avšak někdy se vysoké pórovitosti dosahuje záměrně. Je to např. v případech samomazných výsterek ložisek, kdy se do pórů přivede lubrikant. Míra poróznosti u takových povlaků musí dosahovat od 10 do 30%.

Vysoká míra pórovitosti se zvolením vhodných procesních parametrů dociluje také u povlaků tepelných bariér, kde je tepelná izolace strojních součástí zajištěna právě vysokým obsahem pórů ve struktuře povlaků. Povlaky tepelných bariér tvoří vedle korozivzdorných a oteřuvzdorných povlaků nejpočetnější skupinu využití. [5]

Ve struktuře se pórovitost vyskytuje během následujících procesů:

- Během tuhnutí dochází ke smršťování materiálu
- Při dopadu částic na základní materiál se objevují ve struktuře povlaku nenatavené nebo špatně natavené částice, ty se deformují jen málo a zůstávají mezi nimi mezery
- Nepříliš dobrá soudržnost natavených deformovaných částic (splatů)
- Depozice pod ostrým úhlem způsobuje efekt stínění
- Stínění a odrážení od přilehlých ploch [5]

Pórovitost se ve struktuře nejčastěji objevuje přítomností nenatavených, nebo špatně natavených částic. U nástřiku elektrickým obloukem se vedle těchto částic, které mohou být podle teploty v kapalně, tuhé i kombinované formě objevují také „resolidifikované“ částice. Částice v tekuté formě snadno zaplňují všechny mezery a póry, kdežto špatně natavené částice v tuhé formě se od povrchu odrazí, někdy se na povrchu přichytí. Tím vznikají mezery a póry mezi jednotlivými splaty, neboť nejsou v těsném kontaktu. [5]

Míru pórovitosti ve struktuře povlaku lze eliminovat následujícími způsoby:

1. Ovlivněním míry protavení částic
2. Ovlivněním kinetické energie v okamžiku dopadu a úhlu dopadu

6 Vlastnosti žárového nástřiku

Vlastnosti povlaků vytvořené žárovými nástřiky mají vliv na jeho chování při různých provozních podmínkách. Vlastnosti vrstev je možné ovlivnit přídavným materiálem, vhodným nastavením procesních parametrů, obsahem oxidických vměstků a pórovitostí ve struktuře, kvalitou přilnavosti, soudržnosti splatů atd. Různými technologiemi vytváření žárových nástřiků dostáváme povlaky s odlišnými mechanickými vlastnostmi, proto je při volbě technologie a přídavného materiálu nutná znalost mechanických vlastností žárových nástřiků. Mezi vlastnosti, kterými jsou žárové nástřiky nejčastěji posuzovány, patří:

- Pevnost povlaku
- Tepelné vlastnosti
- Odolnost proti korozi a oxidaci
- Obrobitelnost
- Elektrické vlastnosti
- Přilnavost povlaku k substrátu
- Tvrdost
- Magneto-optické vlastnosti [5]

6.1 Přílnavost

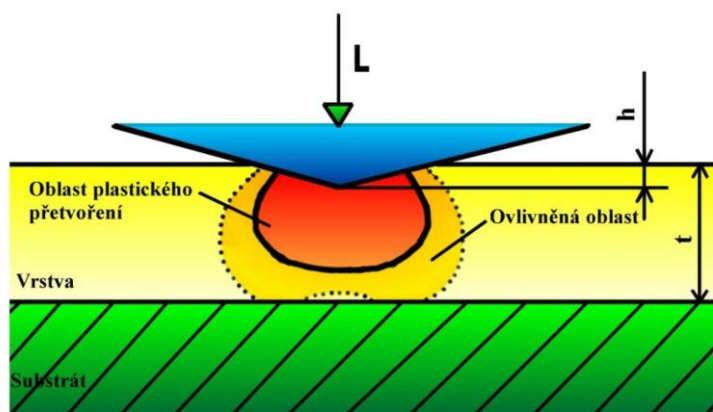
Přílnavost vrstvy k základnímu materiálu je jedna z vlastností, které mají největší vliv na kvalitu vytvořeného povlaku. Soudržnost deformovaných natavených částic i přílnavost vrstvy k základnímu materiálu je nejvíce ovlivněna mechanickým zakotvením dopadajících částic na povrch základního materiálu. Dále je ovlivněna pak meziatomovými vazbami, tzn. chemickou vazbou a Van der Walsovou vazbou. Mezi vrstvou a podkladovým materiálem dochází k difuzi a ke vzniku svarových spojů jen vzácně. Na již dopadené a utuhlé částice na povrchu základního materiálu dopadají další rozžhavené částice. Pevnost povlaku je posuzována podle pevnosti spoje mezi částicemi nově dopadajícími a částicemi již ztuhlymi. Pro všechny žárově stříkané povlaky (keramické, kovové) obecně platí, že adheze k základnímu materiálu se stoupající tloušťkou vytvořeného povlaku klesá. [5], [8]

6.2 Tvrdost

Tvrdost lze definovat jako odolnost povrchu proti místní deformaci, kterou způsobuje zatěžované těleso přesných geometrických tvarů. Princip zkoušek používaných pro měření povlaků spočívá ve vtlačování indentoru (kulička, kužel, jehlan) do zkoušeného materiálu definovaným zatížením po určitou dobu. Tvrdost je vyhodnocována velikostí vtlačeného vtisku (plocha, hloubka, úhlopříčka) po odlehčení. Hloubka proniknutí indentoru do zkušebního materiálu musí být desetkrát menší, než je tloušťka povlaku (viz obr. č. 3).

K vyhodnocení mikrotvrdosti se běžně používá metoda podle Vickerse. Používají se malé zatěžovací síly 3N (300g) kvůli tomu, aby byla změřena tvrdost pouze na povlaku bez vlivu podkladového materiálu. Proto hloubka proniknutí indentoru „h“ nesmí přesáhnout desetinu tloušťky povlaku „t“. Vyhodnocovány jsou úhlopříčky, které zanechá indentor v materiálu po odlehčení zatížení.

Povrch zkušebního materiálu musí být připraven do odpovídajícího stavu pomocí metalografické přípravy. [8]



Obr. 3: Hloubka proniknutí indentoru a oblast ovlivněná vtiskem [9]

6.3 Tření

Tření je jedno z odvětví tribologie, což je vědecký obor, který se zabývá třením, opotřebením a mazáním. Tření je jev, který vzniká při pohybu tělesa v těsném kontaktu s tělesem jiným. Během tření dochází ke ztrátě mechanické energie.

Druhy tření lze členit podle různých kritérií. Vnější tření můžeme pozorovat např. u hranolu, který sklouzává po nakloněné rovině, zde tření vzniká mezi styčnými plochami látek nebo těles. Vnější tření se dále člení na kluzné a valivé. Pokud probíhá tření mezi částicemi uvnitř tělesa, pak se jedná o vnitřní tření. [6], [10]

Další klasifikace tření je na kluzné a valivé. Kluzné tření je takové tření, kdy se vůči sobě pohybují dvě tělesa a jsou ve vzájemném kontaktu. Valivé tření vzniká při valivém pohybu mezi tělesem kruhového průřezu a podložkou. Pokud na sebe působí tuhá tělesa je v ideálním případě oblast kontaktu tvořená bodem nebo křivkou. V reálném případě však dochází k deformaci těles v místě kontaktu a ke kombinaci odvalování a posuvného pohybu. [10]

6.4 Opotřebení

Projevuje se nežádoucí změnou povrchu nebo rozměrů tuhých těles. Je způsobené buď vzájemným působením funkčních povrchů, nebo funkčního povrchu a média, které opotřebení vyvolává.

Mezi nejčastější poškození, které vede k destrukci strojních zařízení, patří právě opotřebení. Opotřebení se projevuje jako odstraňování materiálu z funkčního povrchu součástí mechanickými účinky působících sil, doprovázenými někdy i jinými vlivy, např. chemickými nebo elektrochemickými.

K hodnocení opotřebení materiálů byl stanoven parametr K (koeficient opotřebení). Pro hodnocení míry opotřebení různých materiálů za různých podmínek se v současné době nejvíce používá tento vztah: [10]

$$K = V/L \cdot s$$

V - objem opotřebovaného materiálu

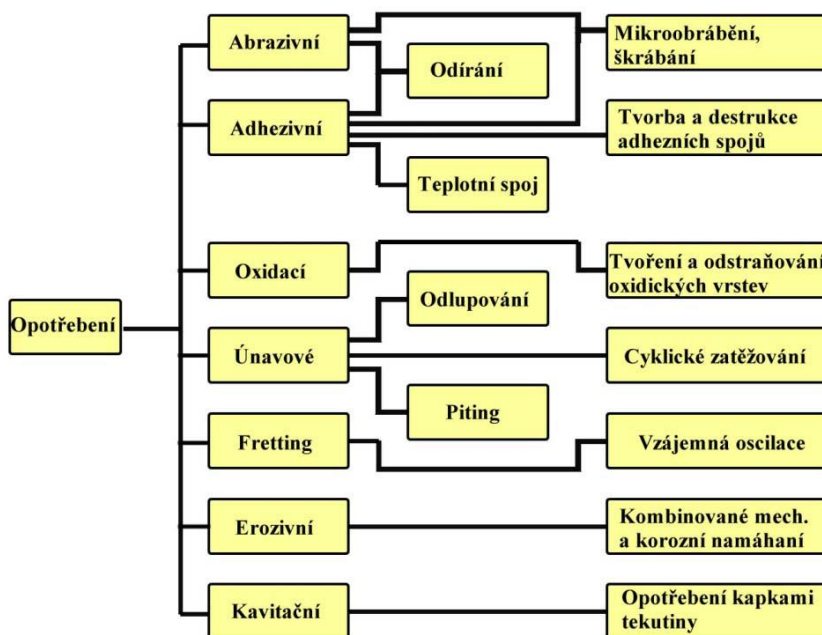
L - normálové zatížení

s - kluzná vzdálenost

Podle podmínek za kterých opotřebení vznikají, rozlišujeme tyto základní druhy opotřebení:

- Adhezivní
- Abrzivní
- Erozivní
- Kavitační
- Únavové
- Vibrační

Uvedené rozdělení reprezentuje jen základní druhy opotřebení. V technické praxi se běžně jednotlivé druhy opotřebení kombinují, jeden druh přechází v jiný. Podrobnější členění druhů opotřebení ukazuje obrázek č. 4. V této práci jsou vytvořené povlaky hodnoceny proti abrazivnímu opotřebení, proto je zde uveden pouze tento druh opotřebení.



Obr. 4: Klasifikace tribologických procesů [9]

Abrazivní opotřebení

Zde se jedná o druh opotřebení, kde se oddělují částice z jednoho funkčního povrchu účinkem druhého drsného a tvrdého povrchu, nebo mohou být mezi dvěma povrchy přítomny volné tvrdé částice, nebo se jedná o zpracovávání materiálu, který obsahuje tvrdé částice. Při vzájemném pohybu dvou součástí dochází k rýhování. Pro tento druh opotřebení je vzhled povrchu typický rýhovaný. Pokud je opotřebení velmi intenzivní, jsou rýhy velmi hluboké a jsou vidět pouhým okem. Velikost poškození funkčního povrchu součástí je závislá především na zatížení, délce kluzné dráhy a tvrdosti. Velký vliv na opotřebení má i množství, velikosti, tvaru a drsnost těchto částí. [10], [11]

Rozlišujeme tři základní typy abrazivního opotřebení (viz obr. č. 5):

První případ

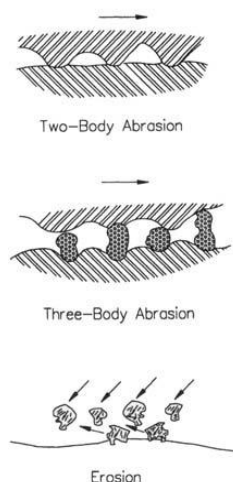
Zde se jedná o dvou bodovou abrazi, to znamená, že povrchové nerovnosti tvrdšího materiálu rýhují materiál měkčí. Typickým příkladem takového opotřebení je broušení, pilování nebo pohyb drsného kovu po povrchu polymeru.

Druhý případ

Nastává v případě, že jsou mezi dvěma povrchy přítomny volné tvrdé částice. V tom případě mluvíme o tří bodové abrazi. Typickým příkladem je leštění brusnou pastou nebo dostane-li se do ložiska písek.

Třetí případ

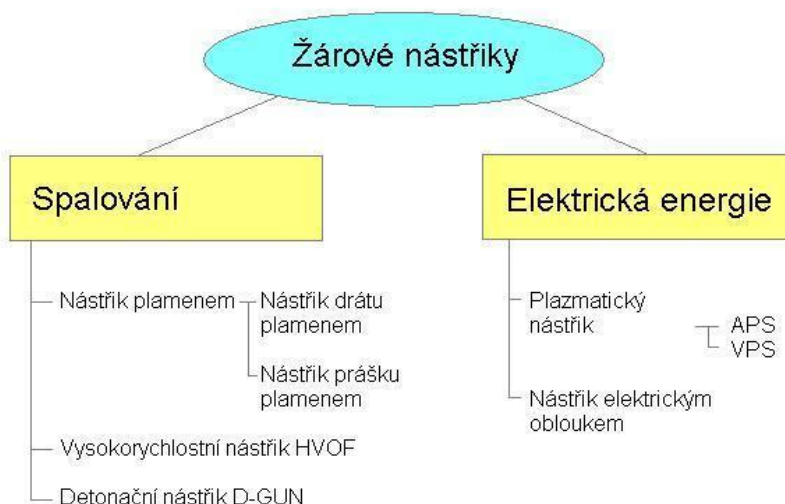
V tomto případě se jedná o erozi. Oddělování částic a poškozování funkčního povrchu se děje tvrdými částicemi nesenými v kapalině nebo v plynu. Příkladem může být tryskání povrchu. [10], [11]



Obr. 5: Typy abrazivního opotřebení [10], [11]

7 Metody žárových nástřiků

Jednotlivé metody žárových nástřiků se rozdělují podle druhu energie, která je potřebná k natavení polotovaru (viz obr. č. 6). Všechny metody vytváření žárových nástřiků fungují na stejném principu (viz kap. 4).



Obr. 6: Rozdělení žárových nástřiků[5]

V této práci jsou zmíněny pouze některé běžné metody vytváření povlaků, které firma BIS Czech používá.

7.1 Metody, které využívají tepelnou energii hoření směsi paliva a kyslíku

- Nástřik plamenem
- Detonační nástřik - (D-Gun)
- Vysokorychlostní nástřik plamenem - HVOF (Hight Velocity Oxigen Fuel)

7.1.1 Nástřik plamenem

Tato metoda nanášení přídavného materiálu plamenem se řadí mezi nejstarší metody žárového nástřiku (viz obr. č. 7). Přípravek v podobě prášku či drátu se přivede do plamene, který je vytvořen hořením směsi kyslíku a acetyleny, popřípadě jiných plynů (propylen, propan, vodík). Zde dojde k natavení nanášeného materiálu a za pomoci čistého stlačeného vzduchu se roztavené částice urychlí na povrch opravované součásti. Čistý a stlačený vzduch se používá kvůli tomu, že rychlost plamene a jeho energie na výstupu nedovoluje urychleným částicím přípravku dosahovat takových rychlostí, které by zaručovaly výborné vlastnosti povrchů, jedná se především o přilnavost. Stlačený vzduch má nejčastěji tlak 0,6 MPa. Tedy kvůli nízké teplotě plamene a nízké dopadové rychlosti částic se tato metoda nehodí pro aplikace, kde je u povlaku kladen vysoký požadavek na hustotu a přilnavost. Z obecného hlediska není tento proces příliš náročný na pořízení i na provoz, proto se využívá poměrně často, avšak vytvořené povlaky jsou méně kvalitní. [5], [12]

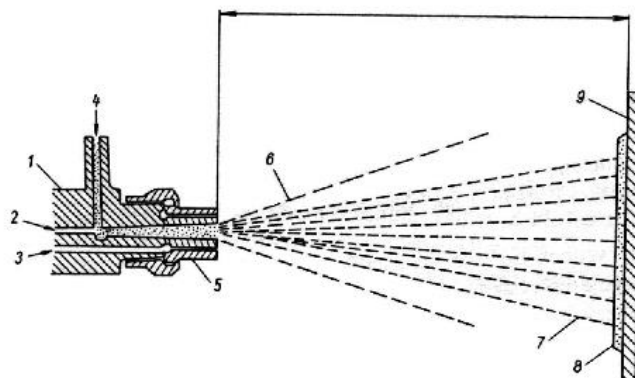


Obr. 7: Žárový nástřik plamenem

Jako přídavného materiálu se u žárového nástřiku plamenem nejčastěji používá prášek nebo drát. Méně často se používají tyčinky nebo plněné trubičky z plastů. Přídavné materiály v podobě drátů mají nejčastěji průměr 2mm; 2,5mm a 3,15mm. Průměr může být i větší. U přídavného materiálu v podobě prášku mají částice velikost obvykle 60 až 120 μ m.

Tato metoda nedovoluje používat všechny druhy přídavných materiálů, neboť teplota plamene dosahuje hořením směsi kyslíku a acetyleny asi 3100°C. Při této teplotě nelze

některé typy přídavných materiálů natavit. Způsob přívodu přídavného materiálu se provádí dvěma způsoby a to buď středem, nebo bočním přívodem. Středem se přivádí polotovary ve formě prášků, drátů a tyčinek a to přímo do plamene speciálně upravenou hubicí (viz obr. č. 8, č. 9). Bočním přívodem jsou přiváděny spíše jen práškové polotovary. Středem stříkací pistole se přivádí přídavný materiál kvůli vyšší teplotě plamene. Je tedy i možné tavit materiály s vyšší teplotou tavení (Molybden). Povlak, který byl vytvořen z prášku, vykazuje obvykle větší hustotu a je homogennější než povrch vytvořený drátem, popř. tyčinkou. [5], [12]



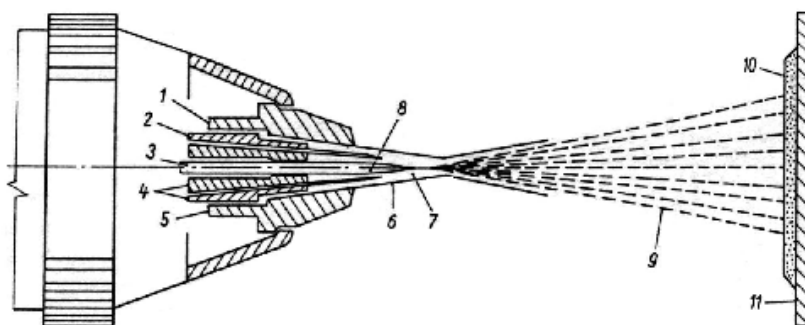
Obr. 8: Schéma žárového nástřiku plamenem – přídavný materiál prášek [12]
1 - stříkací pistole (hořák), 2 - vstup dopravního plynu, 3 - vstup směsi hořlavého plynu a kyslíku, 4 – vstup přídavného materiálu (prášku), 5 - tryska stříkací pistole, 6 - plamen, 7 - paprsek nanášených částic, 8 - povlak žárového nástřiku, 9 - základní materiál

Typické přídavné práškové materiály

- Slitiny na bázi železa
- Slitiny na bázi niklu
- Keramika a cermety

Hlavní aplikace

- Odolnost proti opotřebení
- Chemická odolnost
- Ochrana proti korozi
- Obnova rozměrů



Obr. 9: Schéma žárového nástřiku plamenem – přídavný materiál drát [12]
1 - rozstřikovací vzduch, 2 - směs hořlavého plynu a kyslíku, 3 - přídavný materiál (drát), 4 - tryska pro přívod hořlavého plynu, 5 - tryska pro přívod rozstřikovacího vzduchu, 6 - proud rozstřikovacího vzduchu, 7 - plamen, 8 - proud hořlavé směsi, 9 - paprsek nanášených částic, 10 - povlak žárového nástřiku, 11 - základní materiál

Typické přídavné drátové materiály

- Slitiny na bázi železa
- Slitiny na bázi niklu
- Slitiny na bázi molybdenu
- Měď a slitiny mědi
- Hliník, zinek, Al/Zn slitiny

Hlavní aplikace

- Odolnost proti opotřebení
- Třecí vlastnosti
- Ochrana proti korozi
- Obnova rozměrů
- Elektromagnetická ochrana

Parametry nástřiku:

Teplota plamene bez ochranného plynu je maximálně 3200°C. Vzhledem k této poměrně malé teplotě, se používají jako přídavné materiály především nízko tavitelné kovy, jako jsou např. zinek, hliník, bronz a polymery. Touto metodou lze však také tavit kovy se střední teplotou tavení, to jsou např. ocel, chrom, nikl, molybden, křemík i některé druhy oxidů. Toho se docílí zvýšením teploty plamene s použitím přídavného proudu ochranného plynu. Teplota roztavených částic je až 2500°C, rychlost letících částic se pohybuje v rozmezích od 50 do 80 m/s. Rychlost plamene je v rozsahu od 50 do 100m/s.

Povrchy vytvořené metodou žárového nástřiku plamenem mají hodnoty přilnavosti asi 15 MPa, pórovitost povlaků bývá obvykle mezi 10 a 18%. Ve struktuře se vyskytuje velké množství oxidů. [5], [12]

Hlavní parametry ovlivňující vlastnosti povrchů jsou následující:

- množství kyslíku
- množství hořlavého plynu
- tlak rozstřikovacího vzduchu
- vzdálenost nástřiku
- množství nanášeného přídavného materiálu
- tvar a velikost přídavných materiálů [5], [12]

Výhody metody nástřiku plamenem:

- jednoduchost a operativnost zhotovování vrstvy
- možnost vytváření tenkých vrstev od 0,2 mm po silné vrstvy o tloušťce několika mm
- možnost navařovat malé předměty, hrany
- základní materiál není ovlivněn
- snadná příprava podkladového materiálu
- možnost použití i pro nástřik plastových prášků

Nevýhody metody nástřiku plamenem:

- vyšší prohřátí základního materiálu a tím vznik napětí a případné deformace
- bez použití polohovadla nevhodné pro větší plochy z důvodu rovnoměrnosti vrstvy [13]

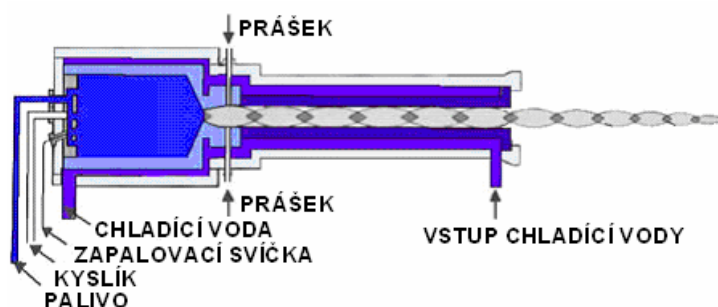
7.1.2 Vysokorychlostní nástřik plamenem - HVOF

Označení HVOF je převzato z angličtiny a znamená: H-high, V-velocity, O-oxygen, F-fuel. Což je již v názvu zmíněný vysokorychlostní nástřik plamenem (viz obr. č. 10). Tato metoda žárového nástřiku je blízká metodě detonačního nástřiku, liší se pouze v tom, že u vysokorychlostního nástřiku je spalovací komora plněna kontinuálně, i hoření plynů probíhá kontinuálně. Ve speciálně vyvinutém hořáku jsou spalovány směsi kyslíku a paliva. Palivo zde může být např. kerosin, propylen, propan, acetylen, vodík atd. Tvar konvergentně divergentní trysky urychluje produkty hoření až k nadzvukovým hodnotám. Do supersonického plamene se přivede pomocí nosného plynu (dusík) přídavný materiál v práškové formě, tam dojde k jeho natavení a urychlení směrem k základnímu materiálu (viz obr. č. 11). Perfektní zakotvení a rozložení urychlených částic k povlakovanému povrchu způsobuje vysoká dopadová rychlost částic prášku. To má za následek dobrou adhezi a vysokou hustotu stříkaných povlaků. [5], [12]



Obr. 10: Vysokorychlostní nástřik plamenem – HVOF

Tato technologie není vhodná pro nástřik keramických povlaků. S ohledem na plazmatický nástřik je teplota plamene poměrně nízká. Prášek se v průběhu letu dostatečně nenataví, a tedy nedojde ani k řádnému rozložení částic na povrchu součásti. Nízká teplota plamene ale také zabraňuje fázovým přeměnám a oxidaci. Pokud vhodně zvolíme parametry nástřiku, lze touto technologií nanášet vrstvy v tlakovém pnutí, čímž je možné zvyšovat tloušťku povlaků. Tlakové pnutí je výhodné i z hlediska únavy povlakovaných materiálů. [5], [12]



Obr. 11: Schéma principu vysokorychlostního nástřiku plamenem - HVOF [14]

Typické přídatné materiály

- Slitiny na bázi niklu, kobaltu
Stellit, Inconel, Triballoy
- Slitiny na bázi železa, AISI 316L
- Karbidy W, Cr, cermety
- MCrAlY

Hlavní aplikace

- Odolnosti proti opotřebení
abrazi, erozi, atd.
- Chemická odolnost
- Vysokoteplotní aplikace
- Obnova rozměrů

Parametry nástřiku:

U vysokorychlostního nástřiku se pohybuje rychlost plamene mezi 500 až 1200 m/s. Rychlost roztavených částic dopadající na povrch je od 200 do 1000 m/s. Podle složení hořlavé směsi a podmínek hoření dosahuje teplota hořících plynů od 3000 do 5000°C. jsou to podobné hodnoty jako u detonačního nástřiku.

V zařízení pro vysokorychlostní nástřik plamenem se používají tyto následující plyny:

- hořlavý plyn - kerosin, propylen, propan, acetylen, vodík
- kyslík
- dusík - dopravní plyn přídatného materiálu
- vodík - řídicí plyn plamene [5], [12]

Jak už bylo uvedeno, technologie HVOF není vhodná pro nástřik keramických materiálů, kvůli nízké teplotě plamene. Touto metodou se stříkají kovy a jejich slitiny s nízkou a střední teplotou tavení. Nejčastěji stříkanými materiály pro technologii HVOF jsou cermety, nejčastěji na bázi karbidů wolframu, chromu a titanu. Povlaky vytvořené vysokorychlostním nástřikem plamenem jsou odolné proti opotřebení a korozi v různých prostředích.

Povlaky vyrobené technologií HVOF a technologií detonačního nástřiku mají srovnatelnou strukturu a vlastnosti. Ve srovnání s povlaky, vytvořené plazmatickým nástřikem mají povlaky zhotovené technologií HVOF lepší kvalitu. Hustota povlaků

představuje až 98% hustoty objemového materiálu. Hodnota adheze dosahuje více jak 83 MPa. Ve srovnání s plazmatickým nástřikem bylo dokázáno, že u povlaků WC/Co vytvořené metodou HVOF nedochází vlivem nízké teploty procesu k rozpadu WC fází a tím tedy zůstávají zachovány primární vlastnosti materiálu (především tvrdost). [5], [12]

Tato metoda má jednu nevýhodu a tou je obecně náročný provoz. Jedná se především o složitost technologického vybavení a o hlučnost během procesu vytváření vrstev. Při provozu je dosahováno hodnot přes 100 dB při frekvenci 8000 Hz. Ve srovnání např. sbíječka má hodnotu 130 dB.

Výhody metody HVOF:

- vysoká hustota nástřiku
- nízká pórovitost a obsah oxidů
- vysoká adheze
- široký výběr prášků
- nízká teplota podkladu do 150°C
- tlakové napětí v nástřikové vrstvě
- vysoká produktivita

Nevýhody metody HVOF:

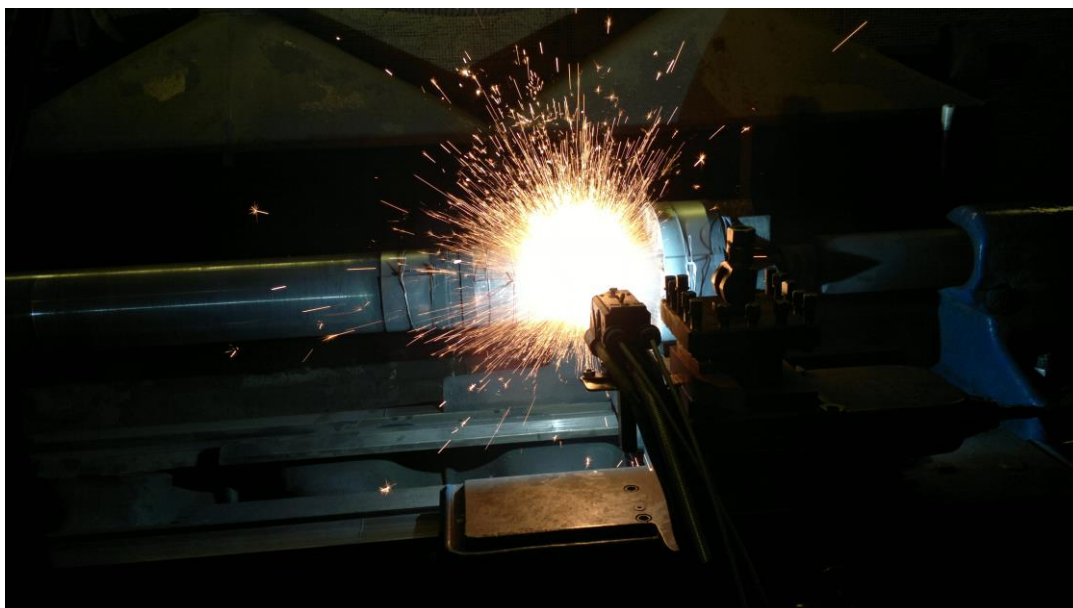
- nelze nanášet keramické povlaky
- omezení pro nástřik vnitřních ploch
- hlučnost, až 130 dB [13]

7.2 Metody, které využívají tepelnou energii elektrického zdroje

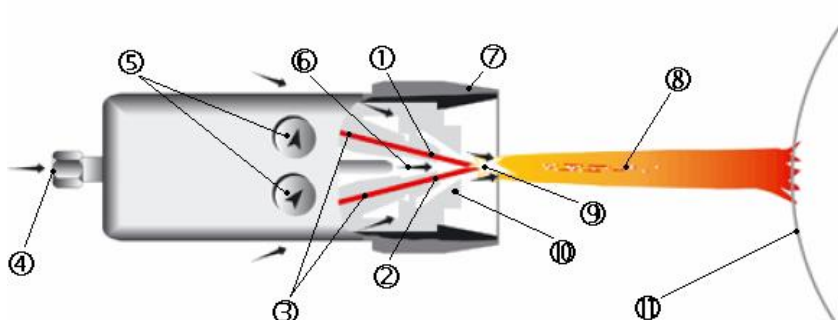
- Plazmatický nástřik - nástřik na vzduchu
 - nástřik ve vakuu
 - nástřik radiofrekvenční
- Nástřik elektrickým obloukem

7.2.1 Nástřik elektrickým obloukem

Princip metody žárového nástřiku elektrickým obloukem spočívá v roztavení přídavného materiálu, který je v podobě dvou drátů přiváděn do stříkací hubice (viz obr. č. 13). Přídavné materiály musí být vodivé, mohou být jak stejného tak i rozdílného složení. Ve stříkací hubici jsou dva dráty vedeny směrem k sobě. Mezi konci drátů hoří elektrický oblouk, který přídavný materiál natavuje (viz obr. č. 14). Dráty se natavují kontinuálně. Roztavené částice přídavného materiálu jsou urychleny na povrch základního materiálu stlačeným plynem, obvykle vzduchem. Stabilita hoření elektrického oblouku mezi konci drátů má významný vliv na kvalitu povlaku. Z tohoto důvodu je nutné kontrolovat stabilitu zdroje elektrického proudu a plynulost podávání drátu. [5], [12]



Obr. 13: Nástřik elektrickým obloukem



Obr. 14: Schéma principu nástřiku elektrickým obloukem [15]

1 - anoda (+), 2 - katoda (-), 3 - přídavný materiál, 4 - přívod vzduchu, 5 - podavače drátů, 6 - proud hnacího vzduchu, 7 - stínění, 8 - proud nataveného materiálu, 9 - el. oblouk, 10 - tryska, 11 - základní materiál

Parametry nástřiku:

Teplota elektrického oblouku dosahuje hodnot od 4000 do 8000°C. Studený hnací plyn snižuje teplotu natavených částic na 3600 až 4000°C. Částice nataveného materiálu dopadají na základní materiál rychlostí od 100 do 150 m/s. Hustota povlaku je 80 až 95%. Hodnota adhezní pevnosti je u této metody zpravidla menší než u nástřiku plazmou nebo HVOF. Pohybuje se v rozmezí od 10 do 40 MPa. Nástřiky vytvořené elektrickým obloukem obsahují střední až vysoké množství oxidů. [5], [12]

Nastavením těchto následujících parametrů lze ovlivňovat vlastnosti vytvářených povlaků:

- velikostí stříkacího proudu
- velikostí stříkacího napětí
- tlakem rozstříkovacího vzduchu
- vzdáleností nástřiku
- množstvím nanášeného přídavného materiálu

Přídavný materiál pro nástřik musí být elektricky vodivý a také plastický, aby z něho bylo možné vyrobit drát. Toto omezení snižuje rozsah používaných materiálů pro nástřik spíše jen na kovy, v poslední době jsou však vyvíjeny i tzv. trubičkové dráty, které umožňují i nástřik cermetů. Typickými příklady nástřiků elektrickým obloukem jsou vrstvy odolné proti korozi, které jsou na bázi hliníku, zinku, mědi či nerezové oceli. Pro další zvýšení korozivzdornosti se povrchové póry zatěsňují impregnačním nátěrem na bázi epoxidových pryskyřic. [5], [12]

Metoda žárového nástřiku elektrickým obloukem umožňuje nanášet přídavné materiály i na takové podkladové materiály, u kterých nesmí dojít k tepelnému ovlivnění. Jsou to např. polymery, sklo, dřevo, kovy s nízkou teplotou tání apod. Je to způsobené tím, že je přídavný materiál rozprašován studeným proudem plynu.

U technologie žárového nástřiku elektrickým obloukem jsou splaty (zatuhlé částice tvořící strukturu) vytvářející strukturu povlaku silnější a jejich velikost je rozdílná oproti jiným technologiím využívající přídavného materiálu ve formě prášku. Vyšší drsnost povrchu povlaku a vysoká míra porerizy je způsobena nerovnoměrnou velikostí částic. V porovnání s jinými druhy žárových nástřiků jsou nanášené vrstvy ovlivněny pouze teplem dopadajících kapiček kovu na substrát. [5], [12]

Typické přídavné materiály

- slitiny na bázi železa
- slitiny na bázi niklu
- měď, slitiny mědi
- hliník, zinek, Al/Zn slitiny
- kompozity

Hlavní aplikace

- odolnost proti opotřebení
- odolnosti proti korozi
- doplnění rozměrů

Výhody metody elektrickým obloukem:

- jednoduchost
- nízké provozní náklady
- mobilita (pro provoz je potřeba pouze stlačený vzduch a elektrická energie)
- vysoký výkon (až 80 kg materiálu za hodinu)
- široké spektrum materiálů dostupných ve formě drátu (lze použít i materiály pro svařování)
- jednoduchý nástřik velkých ploch (ruční stříkání)

Nevýhody metody elektrickým obloukem:

- vyšší pórovitost v nástřikové vrstvě (cca 20%)
- přídavný materiál musí být elektricky vodivý
- nižší soudržnost se základním materiálem (lze omezit použitím tzv. mezivrstvy) [13]

7.3 Moderní metody žárových nástřiků

Mezi nejvíce používané technologie žárových nástřiků patří:

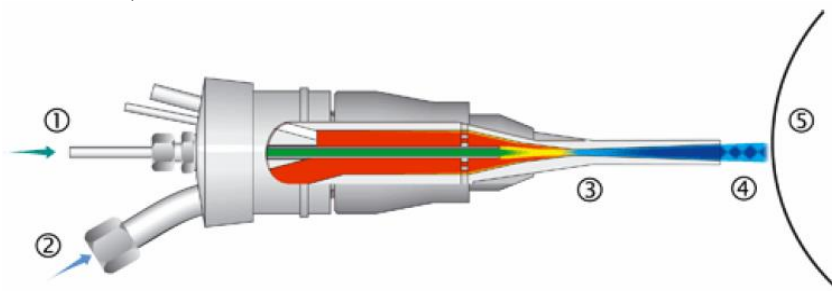
- Nástřik plamenem
- Detonační nástřik – D-Gun

- Vysokorychlostní nástřik plamenem – HVOF
- Plazmatický nástřik
- Nástřik elektrickým obloukem

Tyto výše popsané metody jsou základními metodami. Vedle těchto metod jsou využívány i metody další, které dosahují vyšších parametrů při samotném stříkání. Mluvíme zde především o vyšší rychlosti nanášených částic. [5], [15]

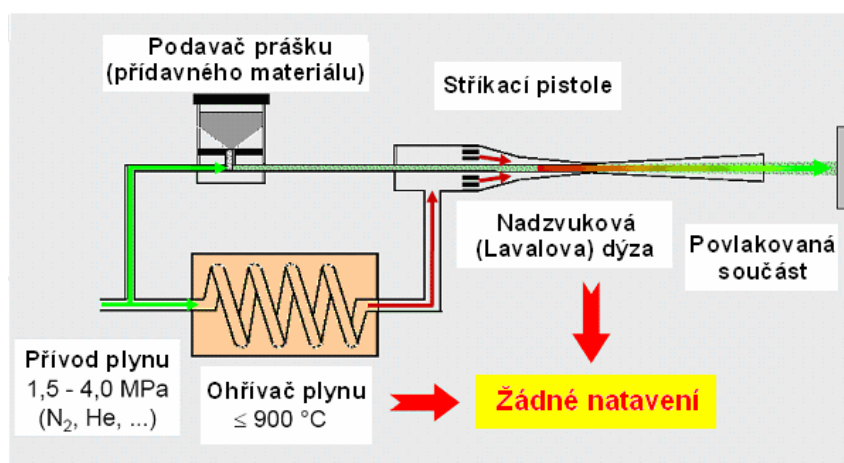
7.3.1 Nástřik studeným plynem (The Cold Spray Process)

Technologie žárového nástřiku studeným plynem patří mezi moderní metody žárových nástřiků, je však stále ve fázi výzkumu a vývoje. Tato metoda je unikátní v tom, že částice přídavného materiálu nejsou vlivem nízké teploty aplikačního plynu ($<900^{\circ}\text{C}$) natavovány. Urychlené částice přídavného materiálu se zakotví na povrchu základního materiálu jen díky své vysoké kinetické energii. Vysoké rychlosti dopadajících částic je docíleno výstupní tryskou, která má tvar Lavalovy dýzy, tedy proud hnacího plynu dosahuje nadzvukových rychlostí a částice dopadající na povrch základního materiálu dosahují rychlostí od 900 do 1200 m/s (viz obr. č. 15). [15], [16]



Obr. 15: Schéma stříkací pistole pro nástřik studeným plynem [15]
1 - přívod přídavného materiálu, 2 - přívod ohřátého plynu, 3 - tryska ve tvaru Lavalovy dýzy, 4 - proud urychlených částic, 5 - základní materiál

U této metody se jako přídavných materiálů nejčastěji využívá měkkých kovů a jejich slitin (Al, Cu). Méně často se využívá i ocel, slitiny Ti, Ni a Co. Jako hnacího plynu se nejčastěji používá dusík, méně často nebo jen ve vzácných případech helia. U hnacího plynu je zapotřebí vyvinout větší tlak ($>100\text{MPa}$). [15]



Obr. 16: Schéma principu nástřiku studeným plynem [16]

Typické přídavné materiály

- tvárné materiály a slitiny
Zn, Al, Ni, Ti, Cu, Ag,
NiCr, CuAl, MCrAlY,
- Niobium, Tantal

Hlavní aplikace

- elektrická a tepelná vodivost
- odolnost proti korozi
- obnova rozměrů

Výhody:

- Během aplikačního procesu nedochází ke vzniku oxidů ve struktuře povlaku
- Nedochází k tepelnému ovlivnění mikrostruktury nanášeného přídavného materiálu ani povlakované součásti
- Vnitřní napětí, které vzniká během chladnutí, je snižováno
- V průběhu nástřiku není potřebná doba na chladnutí
- Možnost nanášení povlaků o větších tloušťkách
- Menší nároky na krytování nanášené součásti

Nevýhody:

- Vysoký průtok aplikačního plynu => vysoká spotřeba aplikačního plynu
- Není možné aplikovat nástřik studeným plynem na některé typy substrátů
- Tvrdé a křehké materiály je možné stříkat pouze v kombinaci s měkčím materiálem jako pojivem [15], [16]

7.3.2 Vysokofrekvenční indukční žárový nástřik

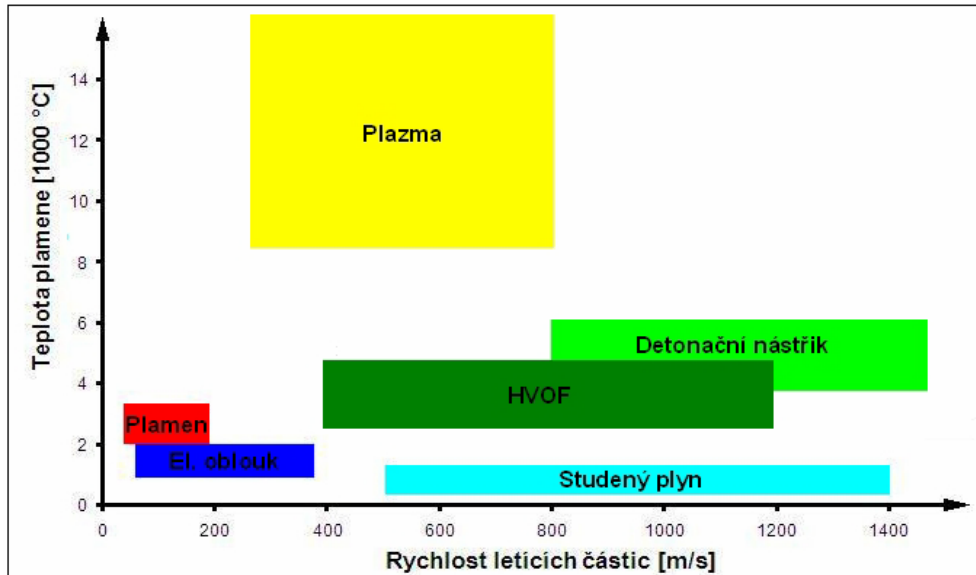
Je další poměrně novou metodou v oblasti žárových nástřiků. Princip této metody spočívá v nahřátí a natavení přídavného materiálu v podobě drátu či tyčinky pomocí vířivých proudů, které vznikají následkem proměnného magnetického pole. K unášení roztavených částic směrem k povlakované součásti se používá stlačený vzduch nebo inertní plyny (Helium, Neon, Argon). Nanášené částice mají velikost od 20 do 120 μm , záleží na tlaku rozstřikujícího plynu. [12]

7.4 Porovnání jednotlivých metod žárových nástřiků

V popisu jednotlivých metod vytváření žárových nástřiků byly některé rozdíly, výhody i nevýhody mezi jednotlivými technologiemi již zmíněny. Právě znalost této problematiky nám řekne, jakou metodu žárového nástřiku použijeme na jaký materiál, jednotlivé aplikace apod. Žárové nástřiky jsou neustále zdokonalovány a vyvíjeny. Postupným vývojem se rozšiřují aplikační možnosti i optimalizují vlastnosti jednotlivých metod žárových nástřiků. Porovnání parametrů jednotlivých metod žárového nástřiku ukazuje tabulka č. 1. Pro přehlednost jsou v tabulce dále uvedeny některé vlastnosti povrchů a jejich nejpoužívanější aplikace. [5], [12]

Technologie nástřiku	Forma přídavného materiálu	Teplota zdroje [°C]	Rychlost částic [m/s]	Přilnavost (adheze) [MPa]	Typické stříkané materiály	Vlastnosti povlaku	Vhodné aplikace
Nástřik plamenem	prášek/drát	2700 - 3200	50 - 100	7 - 18	kovy, slitiny, plasty	vyšší porezita a obsah oxidů	klasická metalizace, méně náročné aplikace
Detonační nástřik	prášek	4000 - 6000	1000<	82	kovy, slitiny, cermety	vysoká tvrdost, nízká porezita a obsah oxidů	ochrana proti opotřebení
HVOF	prášek	2800 - 5200	200 - 1200	60 - 90	kovy, slitiny, cermety	velká hustota, výborná adheze, tlakové pnutí	ochrana proti opotřebení, korozi
Plazmatický nástřik	prášek	12000 - 20000	100 - 800	±68	keramika	porézni v případě keramik	tepelné bariéry, izolátory
Nástřik elektrickým obloukem	drát	4000 - 8000	50 - 300	10 - 40	kovy, slitiny, cermety (trub. dráty)	větší tloušťka, vysoká hustota	otěruvzdorné povlaky, renovace
Nástřik studeným plynem	prášek	<900	500 - 1500	-	měkké kovy a jejich slitiny	větší tloušťka, nízký obsah oxidů	ochrana proti korozi, vodivé povlaky

Tab. 1: Porovnání jednotlivých metod žárových nástřiků



Obr. 17: Porovnání procesů žárového nástřiku z hlediska teploty a rychlosti dopadajících částic [5]

8 Průběh renovace

Dodržením technologického postupu a určitých zásad žárového nástřiku, jsou splněny vlastnosti i kvalita vytvořených povlaků, které jsou v provozu vyžadovány.

Průběh renovace lze rozdělit do tří oblastí:

- 1) Příprava povrchu základního materiálu
- 2) Vlastní nástřik
- 3) Opracování nástřiku na požadované konečné rozměry součásti

8.1 Příprava povrchu základního materiálu

Před samotným nanesením přídavného materiálu na základní materiál, musí být povrch součásti zbaven nečistot (odmaštění, moření) a musí být zdrsňen (tryskání). Vhodně upravený povrch povlakované součásti před metalizací výrazně ovlivňuje kvalitu spojení mezi povlakem a základním materiálem. Kvalitně připravený povrch má také vliv na adhezi povlaku k základnímu materiálu při mechanickém namáhání. [5], [12]

8.1.1 Vstupní kontrola

Vstupní kontrola má za úkol zkontrolovat povrch povlakované součásti, zjistit výskyt prasklin, trhlin a jiných defektů. Také se po přijetí zakázky kontrolují rozměry součásti a porovnávají se s rozměry na výkrese. Válcové součásti, na kterých se budou vytvářet vrstvy, se většinou stáčí na soustruhu o takovou tloušťku vrstvy, která bude žárovým nástřikem nanesena. Další možná kontrola je kontrola geometrie součásti (kontrola kuželovitosti, válcovitosti a jiných odchylek od požadovaných rozměrů). [5]

8.1.2 Čištění povrchu

Mastný povrch povlakované součásti vede ke špatné adhezi natavených částic k základnímu materiálu. Proto se před stříkáním musí povrch součásti zbavit všech nečistot, které zůstaly na strojních dílech např. po obrábění, po provozu v prašném prostředí apod. Odmašťováním se tedy odstraňují všechny druhy nečistot z povrchu povlakované součásti, které jsou k povrchu vázány adhezními silami (prach, kovové třísky) nebo fyzikální adsorpcí (látky tukového charakteru). Odmašťovací prostředky mají za úkol uvolnit nečistoty z povrchu a dopravit je do emulze nebo roztoku. Nejčastěji se mastnoty odstraňují v organických rozpouštědlech, jako jsou alkoholy, ketony, uhlovodíky, benzeny atd. [6]

Pro odstranění korozních produktů z povrchu základního materiálu elektrochemickým nebo chemickým procesem se používá moření. K moření se nejvíce používá kyselin a kyselých solí, alkalická činidla se využívají méně často. [6]

8.1.3 Krytování strojních částí

Plochy součástí, na které nemá být nanesen žárový nástřik, se musí zakrývat. Zakrytí se provádí speciálními pastami, plechy, silikonovou gumou, teflonovými páskami apod. Krycí prostředky, které jsou v blízkém okolí stříkané plochy, musí vydržet přímé vystavení nástřiku. Na krycí prostředky, které nesousedí se stříkanou plochou, jsou kladeny menší nároky než u ploch, které přímo sousedí s povlakovanou plochou. Jsou to např. pásky, lepenky, různé nátěry atd. [5]

8.1.4 Otryskávání

Otryskávání je technologický postup opracování povrchu, při kterém se povrch základního materiálu očišťuje od korozních produktů, grafitu, písku atd. Dalším účelem tryskání je dodat povrchu vhodnou drsnost a zpevnění. Tryskáním se upravují většinou tvrdé materiály. Abrazivní částice dopadají na povrch základního materiálu velkou rychlostí a způsobují tak zdrsňení povrchu (viz obr. č. 18). [6]



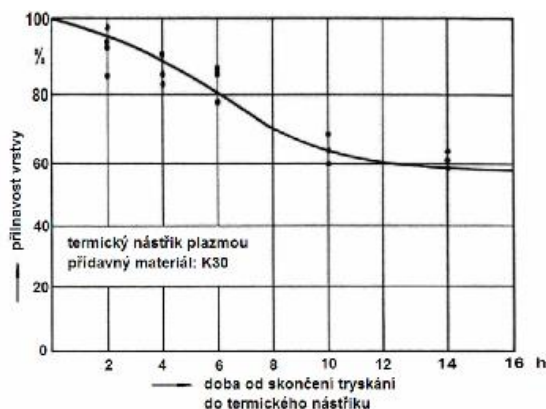
Obr. 18: Zařízení pro otryskávání

Jako tryskacího média se nejčastěji používá:

- Litinová drť a broky – použití do tlaku 0,7MPa; dobrá úběrová schopnost; dražší
- Křemičitý písek – použití do tlaku 0,3MPa; malá úběrová schopnost; levnější
- Sekaný drát – nejvíce pevný, patentovaný drát 160MPa; neštěpí se
- Karbid křemíku, korund – ostřejší zrna [6]

Tvrdá a ostrá zrna tryskací hmoty dopadají na povrch součásti pod různými úhly a vytrhávají z povrchu částice kovu. Takovýmto způsobem je povrch součásti zbaven všech nečistot, okují a rzi a v závislosti na použitém druhu tryskacího média a jeho velikosti zdrsňen. Po dokončení tryskání se pomocí stlačeného vzduchu vyfoukají ze součásti zbytky tryskací hmoty. Po otryskání nesmí být zdrsňená plocha znečištěna (je potřeba vyhnout se kontaktu součásti holýma rukama). [6]

Žárový nástřik musí být proveden v co nejkratší době po otryskání součásti, neboť v průběhu času dochází ke snižování chemické aktivity povrchu v důsledku chemické absorpce plynů z atmosféry a oxidace, což má za následek snížení přilnavosti nanesené vrstvy (viz graf č. 1). Prodleva by neměla být delší než 8 hodin. [12]



Graf 1: Snížení přilnavosti povlaků v důsledku oxidace povrchu podložky [12]

8.2 Vlastní nástřik

Po vykonání operací v kapitolách 8.1.1. až 8.1.4. a po řádném ustavení povlakované součásti do přípravku, nastává samotný proces žárového nástřiku vhodně zvolenou technologií. Žárové nástřiky mohou provádět pouze osoby, které musí být odborně vyškoleny a přezkoušeny dle normy ČSN EN ISO 14918. Manipulátor hořáku a stříkané součásti musí být nastaven tak, aby došlo k vytvoření uceleného a rovnoměrného povlaku. Povlakovaná součást je předehřívána jen pokud to vyžaduje zákazník. Teplota součásti v průběhu žárového nástřiku nesmí přesáhnout hodnotu 150°C, proto je tato teplota také kontrolována. Průběžně se kontrolují rozměry součásti, proces žárového nástřiku je ukončen až tehdy, když je dosaženo konečných rozměrů v technologickém postupu. Teprve až když se ochladí součást na okolní teplotu, provádí se závěrečné kontrolní měření. [5], [12]

8.3 Opracování nástřiku na požadované konečné rozměry součásti

Po provedení žárového nástřiku je nutné odstranit krytování ze součásti, odstranit nežádoucí přestříky a zajistit průchodnost všech zakrytovaných mazacích otvorů a drážek. Poté se povrchy strojních součástí mechanicky opracovávají na přesné rozměry a potřebnou drsnost (soustružení, broušení). Soustružit je možné pouze povlaky, které mají nízkou tvrdost a dobré plastické vlastnosti. Vhodné jsou např. povlaky z čistého bronzu nebo hliníku (CuAl, CuSn₆). Povlaky vytvořené žárovým nástřikem se však nejčastěji opracovávají broušením. Řezné podmínky musí být voleny tak, aby nebyly částice nástřiku vytrhávány. Je proto nezbytné v jakýchkoliv případech používat chlazení. Pokud by chlazení nebylo použito, vznikaly by trhliny na povrchu povlaku. [5], [12]

9 Typy přídavných materiálů

Přídavný materiál hraje důležitou roli při vytváření výborného povlaku s využitím technologie žárového nástřiku. Současný trh nabízí celou řadu přídavných materiálů pro různé technologie žárového nástřiku. Téměř všechny firmy, které vyrábějí zařízení pro technologii žárových nástřiků, také dodávají seznam přídavných materiálů. V tomto seznamu jsou uvedeny vhodné aplikace a i nastavení procesních parametrů žárového nástřiku pro konkrétní materiály. Základní rozdělení přídavných materiálů je podle jejich tvaru a podle chemického složení. [5], [12]

9.1 Rozdělení přídavných materiálů podle jejich tvaru

- Přídavné materiály v podobě prášku
- Přídavné materiály v podobě drátu

9.1.1 Přídavné materiály v podobě prášku

Důvod, proč jsou práškové přídavné materiály nejpoužívanější v oblasti žárových nástřiků, je takový, že téměř všechny druhy přídavných materiálů lze vyrobit v práškové formě. U prášků se posuzuje zejména velikost a tvar částic. Velikost zrn je důležitá vlastnost prášku a přímo souvisí s dobrým protavením částic stříkaného materiálu. Z tohoto důvodu je určujícím prvkem kvality práškových přídavných materiálů právě velikost částic a velikost rozmezí zrn. Přídavný práškový materiál je dražší a kvalitnější, jestliže má těsnější rozmezí. Rozmezí i velikost částic prášku jsou udávány v μm .

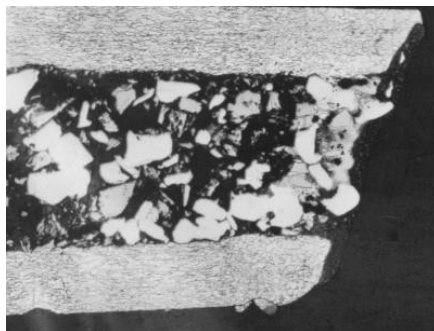
Práškové přídavné materiály se nejčastěji vyrábí atomizací, to je způsob, kdy je tavenina rozprašována do plynného nebo vodního prostředí. Vyrobené prášky se vyznačují nízkou pórovitostí a velmi dobrou tekutostí. Takovýto způsob výroby přídavných materiálů se používá pro výrobu kovových a slitinových prášků. Rychlost procesu se pohybuje mezi 20-60 kg/min, což je velká výhoda. [5], [12]

Sintrováním se vyrábějí karbidy, oxidy a cermety. Způsob výroby spočívá v rozdrčení odlitého bloku na jednotlivé částice požadované zrnitosti. Tyto vyrobené prášky mají nízkou tekutost, což je způsobené nepravidelnými tvary částic. Tekutost prášků je možné zvýšit sferoidizací nadrcených prášků pomocí plazmatu nebo kyslíko acetylenového plamene.

Nejvíce používanou metodou výroby práškových přídavných materiálů je sušení rozstříkem, tzv. aglomerizace. Touto metodou je možné vyrábět oxidické, kovové, karbidické i cermetové prášky. Princip aglomerizace spočívá ve vytvoření kašovité hmoty z požadovaného materiálu, organického pojiva a vody a v dopadu hmoty na rotující disk, kde se rozděluje hmota na jednotlivé částice. Popřípadě může hmota procházet malým otvorem, za nímž je atomizována do jednotlivých částic s použitím dvou proudů stlačeného vzduchu. [5], [12]

9.1.2 Přídavné materiály v podobě drátu

Technologie žárového nástřiku elektrickým obloukem a plamenem jsou technologie, které používají přídavné materiály v podobě drátu hlavně pro nástřik kovových materiálů a slitin. Přídavné materiály ve formě drátu mají jednu zásadní nevýhodu v tom, že drát nelze vyrobit z jakéhokoliv materiálu. Materiály pro výrobu přídavných materiálů v podobě drátů musí být plastické. Tento fakt nesplňují materiály na bázi keramik. Nejčastěji používané průměry drátů jsou: 1,6; 2,0; 2,5 a 3,15 mm. Trubičkové dráty (viz obr. č. 19) byly vyvinuty pro nástřik elektrickým obloukem a jsou kombinací přídavného materiálu ve formě prášku a drátu. Obal je tvořen ze slitiny, vnitřek trubičky je naplněn tvrdými částicemi karbidů, boridů a dalších přísad. [5], [12]



Obr. 19: Podélný řez trubičkovým drátem [5]

9.2 Rozdělení přídatných materiálů podle chemického složení

- kovové přídatné materiály
- keramické přídatné materiály
- speciální druhy přídatných materiálů [12]

9.2.1 Kovové přídatné materiály

Nejstaršími používanými přídatnými materiály jsou materiály na kovové bázi. V počátcích vývoje žárových nástřiků byly používány jen ve formě drátu. V současné době se kovové přídatné materiály vyrábí ve tvaru drátu i v práškové podobě. V menším množství se používají přídatné materiály čistých kovů (Mo, W, Cr, Al, Ta, Fe, Zn, Ni a Cu). Tak například nástřik čistého Molybdenu zvyšuje u strojních součástí kluzné vlastnosti. Nástřiky Zn a Al zase zvyšují korozní odolnost. Pro renovace strojních částí jsou nejvíce využívány přídatné materiály na bázi oceli se zvýšeným obsahem uhlíku (až 0,4%C) a s obsahem chromu (13%Cr, 17%Cr). Slitina NiCrSiB se používá na součásti, kde je kladen požadavek na zvýšenou tvrdost a odolnost proti otěru. Bronzy se nanášejí na strojní součásti, kde jsou vyžadovány dobré kluzné vlastnosti. [12]

9.2.2 Keramické přídatné materiály

Kromě kovových přídatných materiálů se začaly používat ve velké míře také keramické přídatné materiály. Jejich dobré vlastnosti (odolnost proti opotřebení, tvrdost, tepelně izolační vlastnosti) jsou příčinou jejich používání.

Nanášené přídatné materiály mohou být z oxidické, tak z neoxidické keramiky. Do této kategorie přídatných materiálů spadají i sloučeniny, jako jsou např. nitridy, karbidy, boridy atd. Všechny tyto přídatné materiály se vyskytují v práškové podobě. Avšak technologie žárového nástřiku elektrickým obloukem využívá v současnosti tyto materiály i v podobě trubičkových drátů. [12]

Mezi nejpoužívanější oxidické keramické přídatné materiály patří Al_2O_3 , Cr_2O_3 , ZrO_2 a ZrSiO_4 . Oxid hlinitý (Al_2O_3) a oxid chromitý (Cr_2O_3) se používá u součástí, které musí být odolné proti opotřebení a proti otěru. Oxid zirkoničitý (ZrO_2) a křemičitan zirkoničitý (ZrSiO_4) se používá kvůli svým dobrým tepelně izolačním vlastnostem. Oxidické keramické materiály se používají společně s tzv. stabilizátory (MgO, TiO_2 , CaO, MnO). Ty mají za úkol stabilizovat určitou fázi oxidické keramiky.

Z neoxidické keramiky se jako přídatných materiálů používá karbidů (TiC, SiC, B_4C , WC), nitridů (AlN) a silicidů (MoSi_2). Tyto materiály se vyznačují vysokou tvrdostí. [12]

9.2.3 Speciální druhy přídavných materiálů

Cermety jsou přídavnými materiály patřící do speciální skupiny přídavných materiálů. Cermety jsou využívány pro své výhodné kombinované vlastnosti kovu (houževnatost, tažnost) a keramiky (odolnost proti vysokým teplotám, tvrdost, odolnost proti opotřebení). Nejvíce používanými cermety jsou např. $\text{Cr}_3\text{C}_2+\text{NiCr}$ 25% a $\text{WC}+\text{Co}$ 8-12%.

Následující přídavný materiál, který patří do této skupiny, je materiál Ni-grafit. Obsahuje kovovou i nekovovou složku a je využíván pro žárový nástřík labyrintových ucpávek proudových motorů. Nikl tvoří obálku na grafitu a chrání ho tak v průběhu nástříku před oxidací a rozkladem při vysokých teplotách.

Do speciální skupiny přídavných materiálů patří i materiály s exotermickým účinkem. Jedná se o materiály na bázi Ni-Al a Ni-Ti. Tyto přídavné materiály se využívají kvůli zvýšení adheze vrstvy k podkladovému materiálu. [12]

Ve firmě BIS Czech s.r.o. jsou používány práškové, drátové i trubičkové přídavné materiály. Dle požadavků zákazníka na užité vlastnosti povlaků jsou vhodně zvoleny přídavné materiály kovové, keramické nebo speciální. Metoda vytváření žárových nástříků je pak vybrána dle druhu přídavného materiálu.

Povlaky na zkušebních vzorcích byly v této práci vytvořeny elektrickým obloukem. Byly zde použity drátové (NiTi, NiCr) a trubičkové (ARC 502) přídavné materiály. Tyto materiály firma používá k ochraně proti opotřebení a k doplnění rozměrů strojních součástí ve strojním průmyslu. Přídavné materiály byly neneseny na zkušební vzorky v různých tloušťkách. Následně byla hodnocena přilnavost těchto povlaků vhodnými metodami analýz žárových nástříků v závislosti na rostoucí tloušťce.

II. PRAKTICKÁ ČÁST

10 Představení společnosti BIS Czech s.r.o.

BIS Czech s.r.o. byla založena v roce 1993. Je součástí nadnárodní skupiny Bilfinger Berger Industrial Services GmbH, předního světového poskytovatele průmyslových služeb ve výstavbě a údržbě průmyslových a energetických zařízení. Společnost je držitelem certifikovaného integrovaného systému řízení. Zaměstnává více než 1 200 pracovníků, obrat převyšuje 1,5 miliardy Kč.

Mezi hlavní činnost firmy patří komplexní údržba a opravy výrobních technologií, výroba strojních částí technologického zařízení a investiční výstavba v chemickém, energetickém, plynárenském průmyslu a příbuzných odvětvích. [17]

Renovace strojních dílů

V této oblasti firma poskytuje moderní metody renovace součástí strojních zařízení pomocí žárového nástřiku, navařování nebo lapování. Samozřejmostí je konečné strojní obrábění funkčních ploch ve strojních dílnách, výstupní kontrola a provedení defektoskopických zkoušek. V provozu se používají následující metody:

- Žárový nástřik elektrickým obloukem (OSU G30/4-LD/U2)
- Žárový nástřik plamenem (kyslík + acetylén) (Castodyn DS 8000)
- Práškové navařování ostrých hran plamenem (kyslík + acetylén) (Eutalloy Super Jet)
- Navařování otvorů elektrickým obloukem v ochranné atmosféře (ID WELD 2500)
- Renovace pomocí metalizační pistole (TOP JET 2)
- Renovace pomocí metody HVOF - vysokorychlostní plamenový nástřik
- Renovace pomocí navařování (svařovací robot CLOOS) [17]

11 Popis experimentu

Hlavním cílem této práce je vyhodnotit tloušťky vrstev přídavných materiálů, které je ještě možné na strojní součásti nanášet, aniž by docházelo k výraznějšímu ovlivnění funkčních vlastností povlaků. Funkčními vlastnostmi povlaků jsou zde míněny vlastnosti, jakými jsou přilnavost vrstev k základnímu materiálu a odolnost proti opotřebení. Na zkušební vzorky byly nanášeny tři typy přídavných materiálů o různých tloušťkách. Přídavné materiály NiTi a ARC 502 byly použity jako mezivrstvy pod přídavný materiál NiCr, který byl použit jako funkční vrstva. Povlaky vytvořené těmito přídavnými materiály se používají jako ochranné povlaky pro strojní součásti ve sklářském průmyslu a příbuzných odvětvích.

Hodnocení vlastností žárových nástřiků bylo provedeno pomocí tahové zkoušky, podle níž byly získány informace o adhezivní pevnosti různých tloušťek povlaků mezi základním materiálem a vytvořeným povlakem. Dále bylo provedeno měření pomocí metody Dry Sand/Rubber Wheel test a metody PIN-on-DISK. Díky těmto měřením byla stanovena odolnost proti abrazivnímu opotřebení vytvořených vrstev. Další měření, které bylo provedeno, bylo hodnocení tvrdosti vrstev a mikrotvrdost povlaků v příčných řezech HV0,3. Hodnocením mikrostruktury povlaků na metalografických příčných výbrusech byla vyhodnocena kvalita rozhraní mezi vrstvou a základním materiálem, homogenita a pórovitost povlaku.

11.1 Zařízení pro nástřik elektrickým obloukem OSU G 30/4-LD/U2

Na tomto zařízení byly zároveň nástříkány všechny zkušební vzorky, které se v práci vyskytují. Zařízení OSU G 30/4 se ve firmě BIS Czech s.r.o. používá častěji než novější zařízení Eu Tronic Arc Spray 4 z důvodu jemnějšího rozptylu částic na základní materiál a nižší pórovitosti ve struktuře povlaku. Povlaky vytvořené elektrickým obloukem se používají nejčastěji k ochraně proti opotřebení, korozi a k doplnění rozměrů. Tato technologie tepelného nástřiku potřebuje pouze elektřinu a stlačený vzduch, je rychlá a jednoduchá, dokáže pokrývat rozsáhlé plochy velkého počtu dílů a nemá tepelný vliv na základní materiál. Zařízení OSU G 30/4 (viz obr. č. 20) umožňuje nastavovat procesní parametry, jako jsou napětí, proud a tlak rozstřikovacího plynu. Různou volbou těchto parametrů lze docílit požadovaných vlastností vytvořených povlaků. Rychlost podávání drátu je možné nastavovat na stříkací pistoli LD/U2 (viz obr. č. 21). Rozsah nastavení parametrů je uveden v tabulce č. 2.



Obr. 20: Zařízení OSU G 30/4



Obr. 21: Stříkací pistole LD/U2

I	0 – 300	[A]
U	0 – 42	[V]
p	0 – 5	[bar]

Tab. 2: Rozsah nastavitelných parametrů na zařízení OSU G 30/4

11.2 Použité přídavné materiály

První přídavný materiál je ve formě trubičkového drátu od firmy Castolin Eutectic s označením ARC 502. Tento materiál slouží jako podkladový materiál a používá se pro doplnění rozměrů. Druhý přídavný materiál ve formě drátu je dodáván od firmy Interweld Austria GmbH a jeho katalogové označení je NiTi. I tento přídavný materiál se v našem případě používá jako podkladový materiál určený k doplnění rozměrů. Třetí přídavný materiál je také ve formě drátu a je dodáván od výrobce Flame Spray Technologies, jeho katalogové označení je W-385.1 (NiCr 80/20). Tento funkční materiál vytváří povlaky, které jsou odolné proti opotřebení, korozním plynům a oxidaci do 980°C. Vytvořené povlaky jsou velmi tvrdé ale obrobitelné.

Přídavný materiál ARC 502

Průměr drátu: 1,6 mm

Chemické složení:

	C	Si	Mn	B	Ti	Cr	Fe
%	4,3	1,2	0,8	0,8	2,7	17	Bal

Způsob nástřiku: plošně

Procesní parametry:

Proud I = 180 – 200 A
 Napětí U = 30 V
 Tlak hnacího plynu p = 0,5 MPa
 Depoziční vzdálenost L = 180 – 200 mm

Přídavný materiál NiTi

Průměr drátu: 1,6 mm

Chemické složení:

	C	Mn	Si	S	P	Ni	Cr
%	0,014	0,402	0,441	0,001	0,003	95,9	0

	Mo	Cu	Al	Zn	Fe	Ti

%	0,01	0,003	0,06	0	0,012	2,99
---	------	-------	------	---	-------	------

Způsob nástřiku: plošně

Procesní parametry:

Proud	I = 150 – 180 A
Napětí	U = 30 V
Tlak hnacího plynu	p = 0,5 MPa
Depoziční vzdálenost	L = 150 – 180 mm

Přídavný materiál NiCr 80/20

Průměr drátu: 1,6 mm

Chemické složení:

Ni – 80,00%; Cr – 20,00%

Způsob nástřiku: plošně

Procesní parametry:

Proud	I = 150 – 200 A
Napětí	U = 30 V
Tlak hnacího plynu	p = 0,5 MPa
Depoziční vzdálenost	L = 150 – 200 mm

11.3 Příprava zkušebních vzorků

Bylo vyrobeno 9 vzorků z oceli ČSN 17 255, které byly nařezány z pásoviny na čtvercové kousky o rozměrech 50 x 50 x 8 mm (viz obr. č. 22). Tyto zkušební vzorky byly určeny k hodnocení mikrostruktury, odolnosti proti opotřebení, ke stanovení tvrdosti a mikrotvrdosti povlaků.

Dále byly vyrobeny válcové vzorky – pr. 40mm x délka 50mm pro stanovení adhezivní pevnosti povlaků. Celkem bylo vyrobeno 9 sad vzorků po 3 kusech, tedy 27 vzorků. Jedna sada odpovídala jednomu typu materiálu povlaku. Počet vzorků pro 1 sadu je 3ks (minimální počet pro stanovení přílnavosti v tahu 1 typu materiálu). Povlaky vytvořené žárovými nástřiky v různých tloušťkách na jednotlivých vzorcích jsou uvedeny v přehledné tabulce č. 3.

Označení vzorku	Podkladová vrstva - tloušťka vrstvy v [mm]	Funkční vrstva - tloušťka vrstvy v [mm]	Výsledná tloušťka vrstvy v [mm]
1	-	NiCr - 0,4	0,4
2	NiTi - 0,4	-	0,4
3	NiTi - 0,4	NiCr - 0,4	0,8
4	NiTi - 0,8	NiCr - 0,4	1,2
5	NiTi - 1,1	NiCr - 0,4	1,5
6	ARC 502 - 0,4	-	0,4
7	ARC 502 - 0,4	NiCr - 0,4	0,8
8	ARC 502 - 0,8	NiCr - 0,4	1,2
9	ARC 502 - 1,1	NiCr - 0,4	1,5

Tab. 3: Přehled vytvořených vrstev a jejich tloušťek

Všechny zkušební vzorky byly vyrobeny ve společnosti BIS Czech s.r.o. pomocí technologie elektrického oblouku na zařízení OSU G 30/4-LD/U2. Před vlastním nástřikem bylo provedeno chemické čištění všech vzorků, poté byly vzorky otryskány v tryskací kabině umělým korundem (Al_2O_3) při tlaku 0,7MPa. Otryskáním byl povrch základního materiálu zdrsňen. Tím došlo ke zvýšení adheze mezi základním materiálem a povlakem. Vzorky po otryskání jsou znázorněny na obrázku (viz obr. č. 23). Ihned po otryskání byl proveden vlastní nástřik vybranými přídatnými materiály. Zkušební čtvercové vzorky byly vzhledem k rovinné ploše upnuty ve sklíčidle a poté byly plošně a ručně nastříkány na požadovanou tloušťku vrstev. Válcové vzorky byly upnuty ve speciálním přípravku a také byly plošně nastříkány. U válečků nesměl být povrch povlaku určený k měření v opracovaném stavu, neboť na hladkém povrchu by nedrželo lepidlo, které je pro hodnocení adhezivní pevnosti povlaků nezbytné. Přídavek na broušení byl u čtvercových vzorků navýšen o 0,2 mm. Aby teplota povlakované součásti nepřesáhla teplotu fázově-strukturálních přeměn, byla v průběhu procesu kontrolována pomocí digitálního teploměru. Tloušťka vrstev byla kontrolována po každém přejezdu po vychladnutí vzorku. Po zhotovení povlaků (viz obr. č. 24), byly vzorky broušeny na požadovanou drsnost (viz obr. č. 25).



Obr. 22: Zkušební vzorek č. 8 z oceli ČSN 17 255



Obr. 23: Vzorek po otryskání při tlaku 0,7 MPa



Obr. 24: Povlak NiCr vytvořený na vzorku



Obr. 25: Vzorek po obroušení

11.4 Metalografická příprava

Pro hodnocení mikrostruktury vytvořených povlaků byl proveden metalografický výbrus na všech čtvercových zkušebních vzorcích. Mikrostruktura se hodnotí v příčném řezu povlaku, který je veden kolmo na rozhraní mezi povlakem a základním materiálem. V řezu je pak možné sledovat jak kvalitu rozhraní i možné změny ve struktuře základního materiálu, ke

kterým mohlo dojít při nástřiku povlaku, tak i mikrostrukturu povlaku v závislosti na jeho tloušťce. [5]

Před metalografickou přípravou, která se skládala z broušení a leštění, byly zkušební vzorky rozpuřeny řezem kolmým na povlak. Dělení vzorků bylo provedeno řezným kotoučem při nízké rychlosti řezného kotouče a za pomoci intenzivního chlazení, které by mělo zabránit tepelnému ovlivňování zkušebních vzorků. Aby nebyla porušena přilnavost mezi základním materiálem a povlakem, byl řez veden směrem od povlaku k substrátu.

12 Metody hodnocení žárových nástřiků

12.1 Hodnocení mikrostruktury povlaků

První metodou, kterou byly povlaky vytvořené žárovými nástřiky hodnoceny, bylo sledování mikrostruktury. Hodnocení mikrostruktury povlaků se provádí kvůli zjištění vlastností povlaků, predikci jejich životnosti a výběru nejvhodnějších parametrů nástřiku.

Z popisu mikrostruktury povlaků by měly být patrné následující informace:

- Charakter morfologie zrn a jejich orientace (textura)
- Popis defektů typu pórů, nenatavených částic, produktů oxidace nebo sekundárních fází, případně mikrodefektů, jejich množství a rozložení
- Distribuce zmíněných defektů vzhledem k tloušťce povlaku
- Existence případné deformace (mechanické nebo teplotní) povlaku v blízkosti substrátu [5]

Mikrostruktura vytvořených povlaků byla vyhodnocena na optickém mikroskopu NIKON OPTIPHOT-100 (viz obr. č. 26). Jeho maximální zvětšení je 500x. Pomocí digitální kamery je umožněn přenos obrazu do počítače. Vzorky vzhledem ke svým rozměrům nebyly zalaty do zalévací směsi. Na předem připravených příčných řezech zkušebních vzorků byly vytvořeny fotografie mikrostruktur žárově stříkaných povlaků.

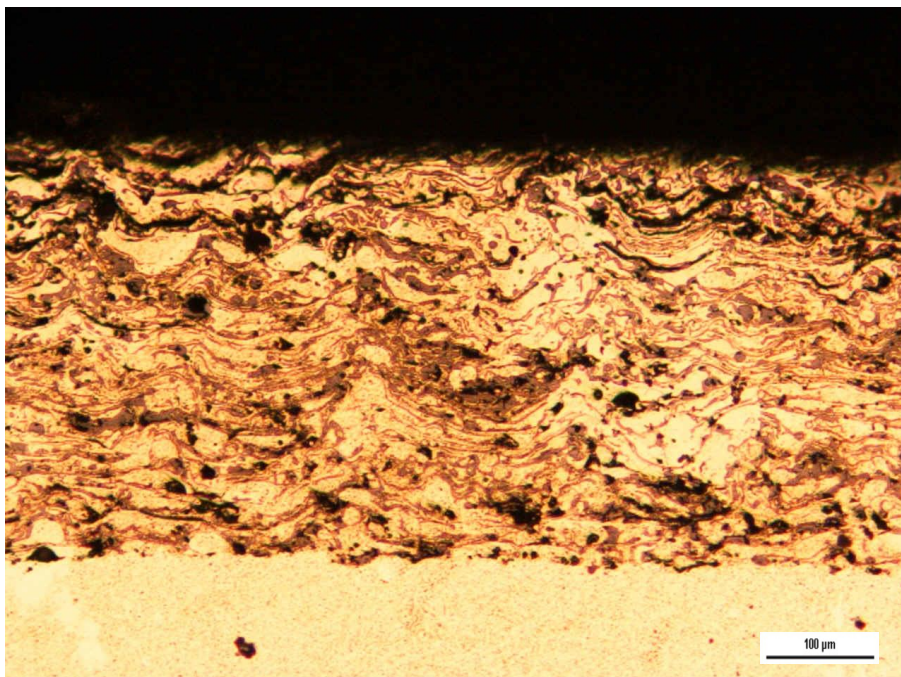


Obr. 26: Optický mikroskop NIKON OPTIPHOT-100 s digitální kamerou

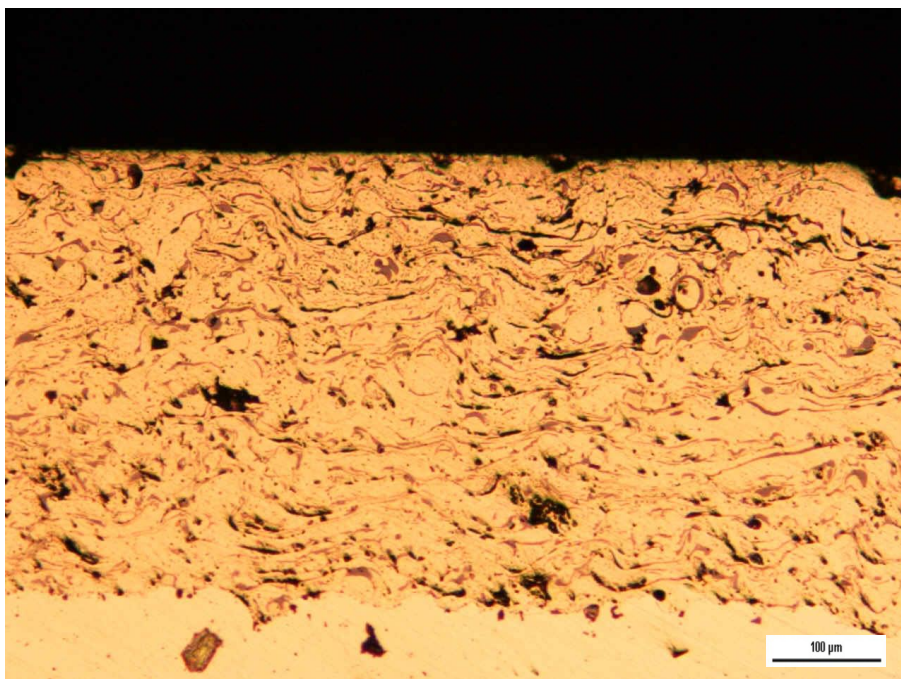
12.1.1 Vyhodnocení mikrostruktury

Mikrostruktura žárově stříkaného povlaku je lamelární, tvořená jednotlivými deformovanými částicemi (tzv. splaty), nenatavenými nebo jen částečně natavenými částicemi, póry a oxidickými částicemi. Vzhledem k její složitosti a heterogenitě bývá obtížné zvolit vhodnou metodu pozorování, avšak její hodnocení má nezastupitelnou roli v procesu zkoumání vlastností povlaků, predikci jejich životnosti a výběru optimálních parametrů nástřiku [5].

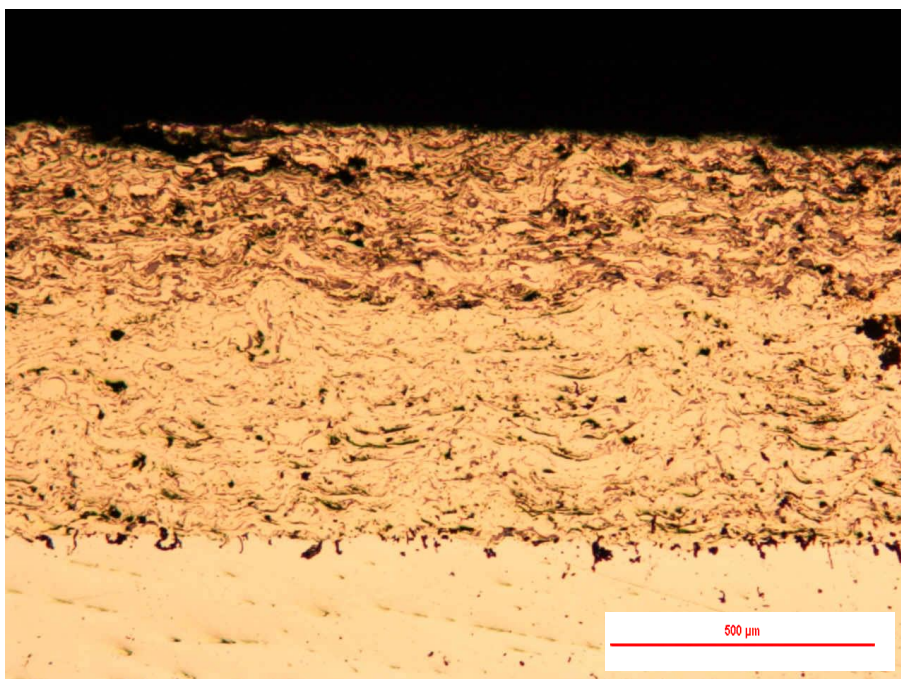
Mikrostruktura hodnocených povlaků je tvořena oxidickými částicemi, které jsou zobrazeny šedivou barvou. Černou barvou jsou znázorněny póry. Povlaky jsou velice dobře ukotvené k základnímu materiálu. Na rozhraní mezi substrátem a povlakem nebyly nalezeny žádné trhliny. Fotografie byly pořízeny pomocí objektivu se zvětšením 50x a 100x.



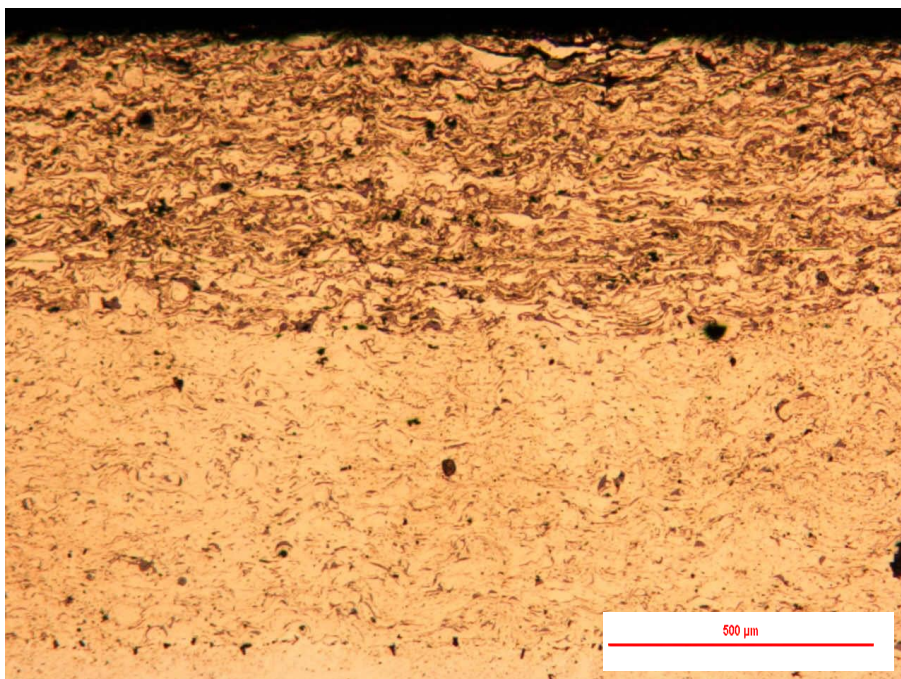
Obr. 27. Mikrostruktura povlaku NiCr v řezu; tloušťka vrstvy 0,4 mm; zvětšení 100x; vzorek č. 1



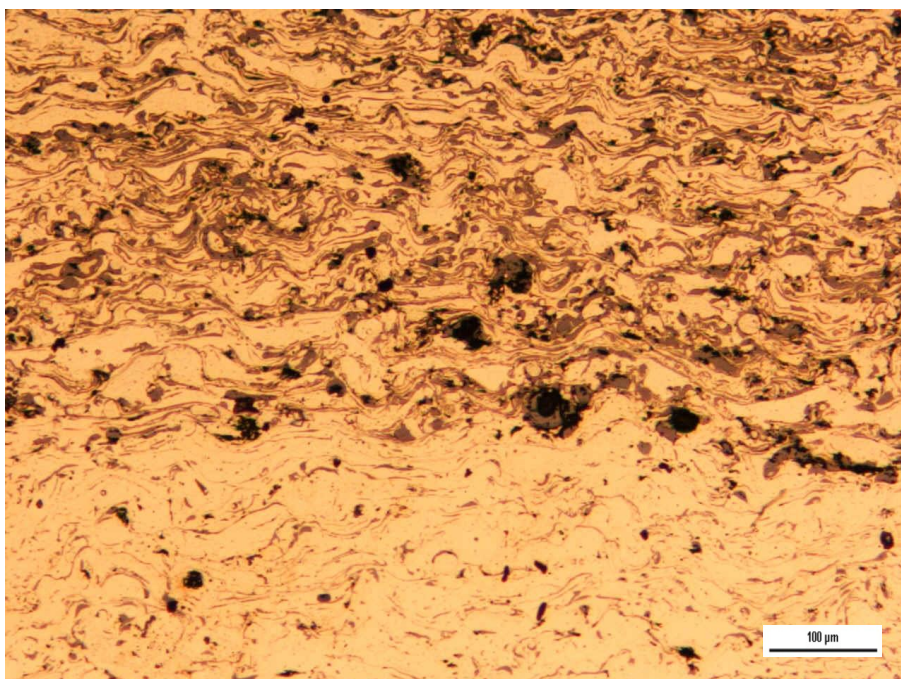
Obr. 28. Mikrostruktura povlaku NiTi v řezu; tloušťka vrstvy 0,4 mm;
zvětšení 100x; vzorek č. 2



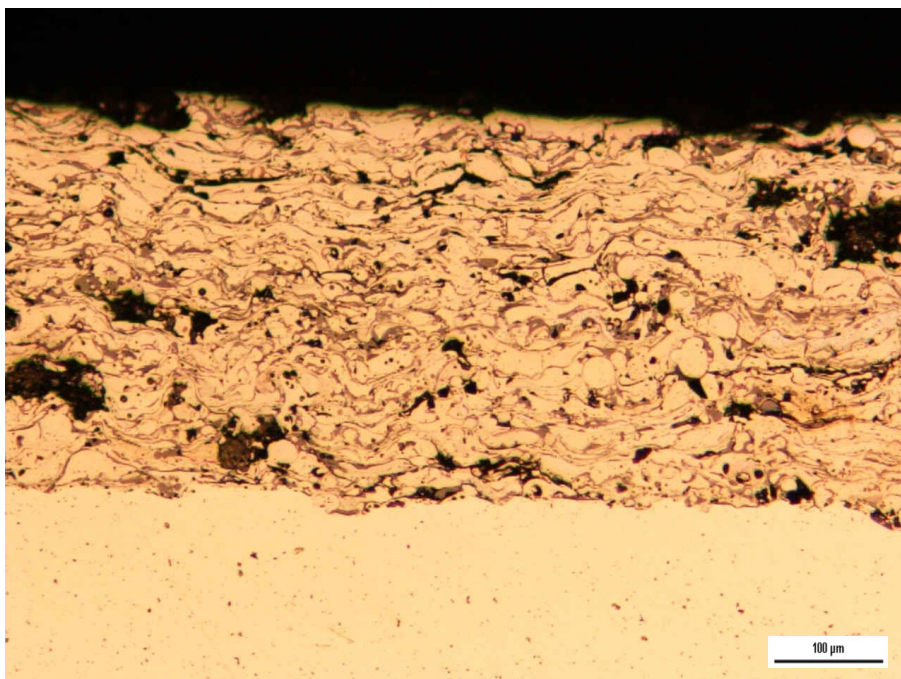
Obr. 29. Mikrostruktura povlaku NiTi + NiCr v řezu; tloušťka vrstvy 0,4 + 0,4 mm;
zvětšení 50x; vzorek č. 3



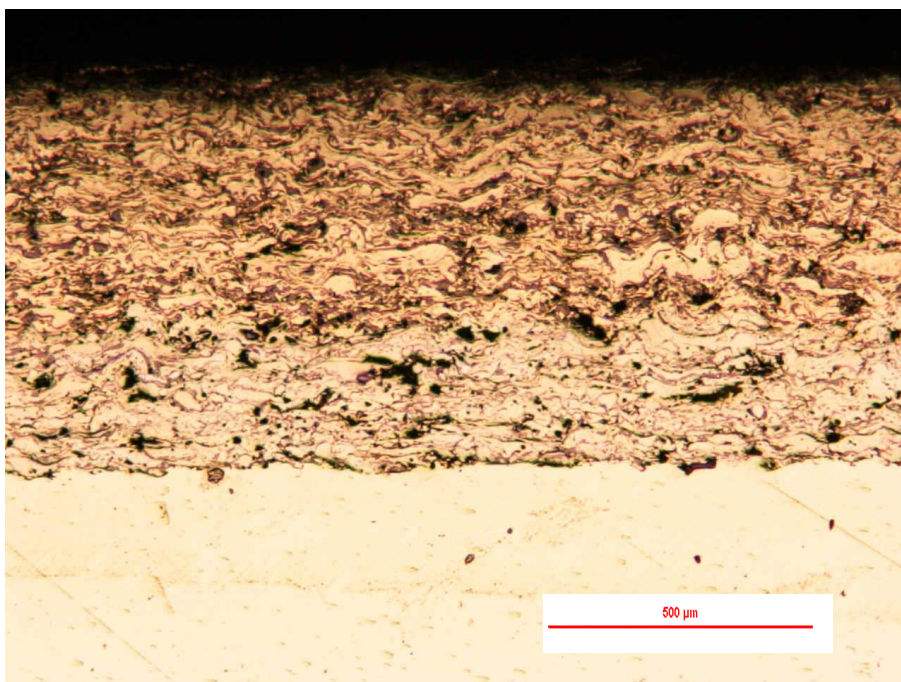
Obr. 30. Mikrostruktura povlaku NiTi + NiCr v řezu; tloušťka vrstvy 0,8 + 0,4 mm;
zvětšení 50x; vzorek č. 4



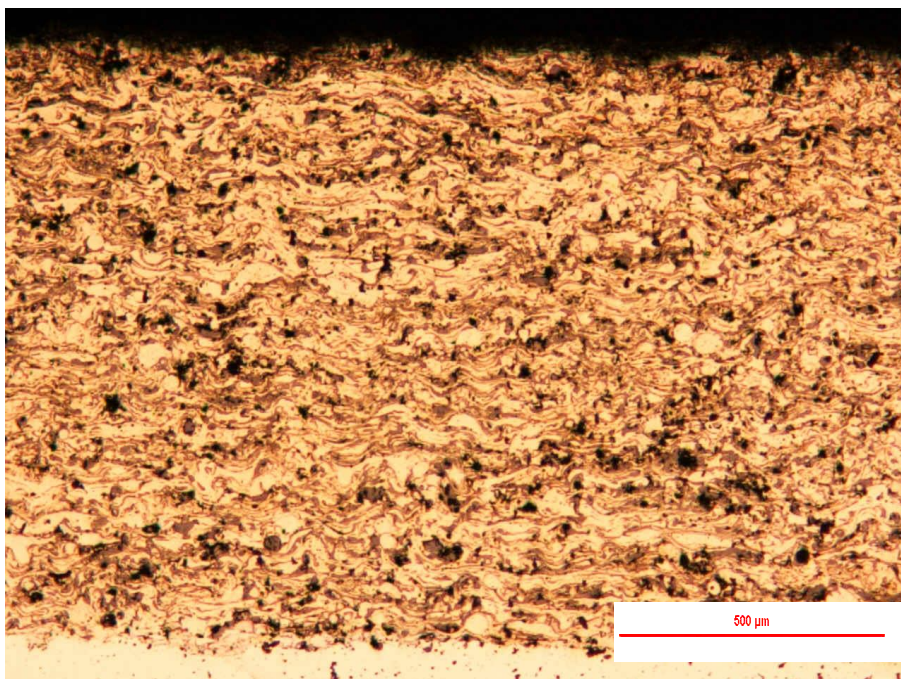
Obr. 31. Mikrostruktura povlaku NiTi + NiCr v řezu; tloušťka vrstvy 1,1 + 0,4 mm;
zvětšení 100x; vzorek č. 5



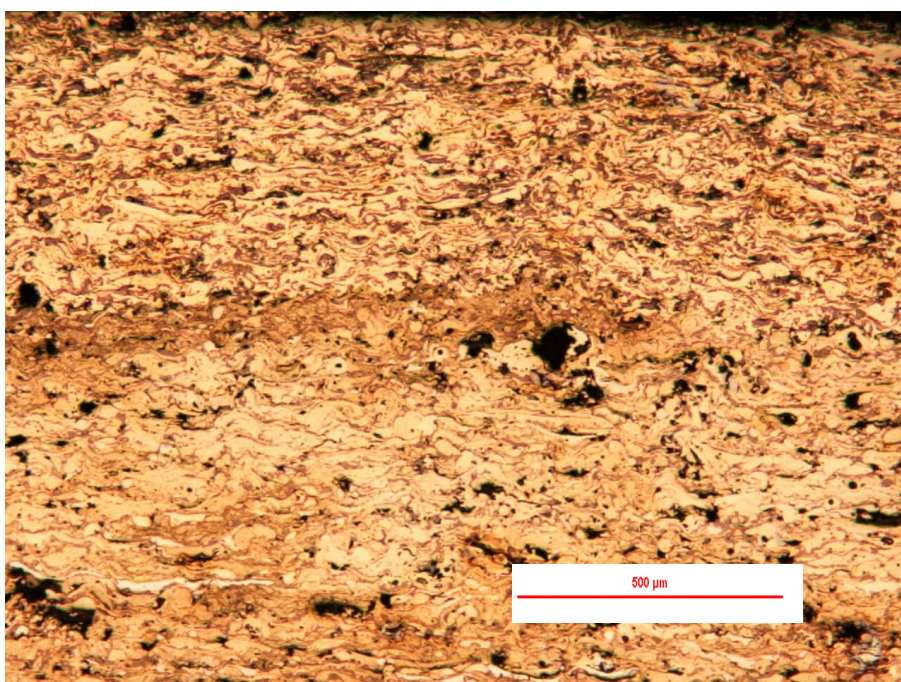
Obr. 32. Mikrostruktura povlaku ARC 502 v řezu; tloušťka vrstvy 0,4 mm;
zvětšení 100x; vzorek č. 6



Obr. 33. Mikrostruktura povlaku ARC 502 + NiCr v řezu; tloušťka vrstvy 0,4 + 0,4 mm;
zvětšení 50x; vzorek č. 7



Obr. 34. Mikrostruktura povlaku ARC 502 + NiCr v řezu; tloušťka vrstvy 0,8 + 0,4 mm; zvětšení 50x; vzorek č. 8



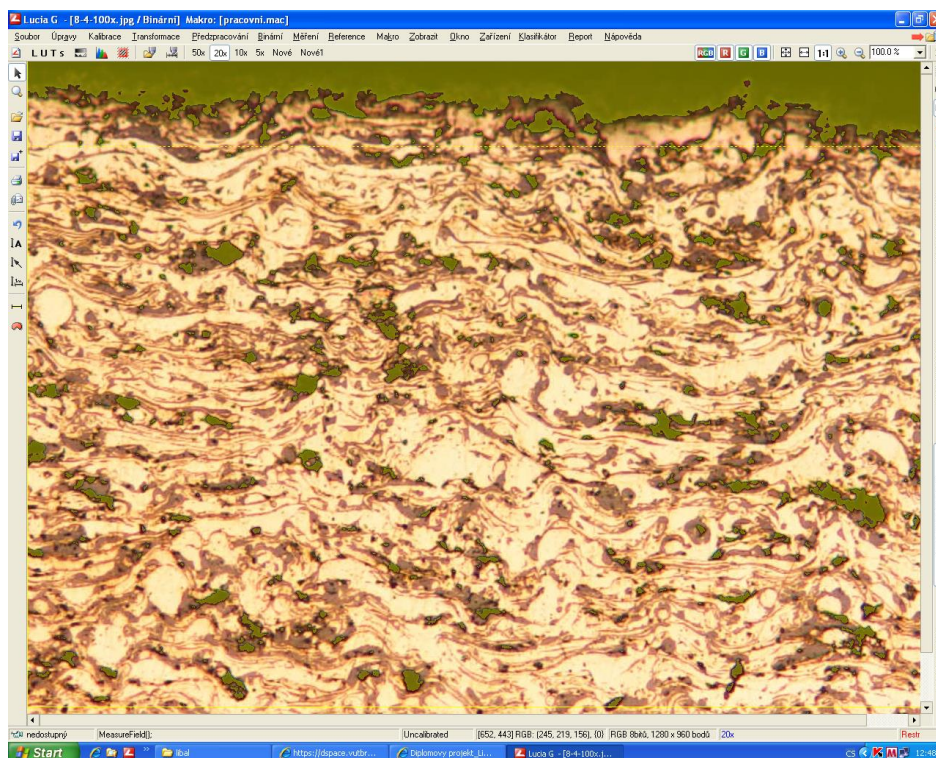
Obr. 35. Mikrostruktura povlaku ARC 502 + NiCr v řezu; tloušťka vrstvy 1,1 + 0,4 mm; zvětšení 50x; vzorek č. 9

Na metalografickém rozboru u prvního vzorku (viz obr. č. 27) je mikrostruktura povlaku NiCr. Kvalita spojení na rozhraní mezi vrstvou a základním materiálem je bez známk trhlín. Oxidické částice i póry jsou rovnoměrně rozloženy v celém objemu povlaku. U materiálu NiCr byla naměřena porezita 4,02%. Vrstva z NiTi (viz obr. č. 28), která je nanášena na druhý vzorek, je opět velice dobře zakotvena k základnímu materiálu. Oxidy, póry a jiné vměstky i nenatavené částice jsou oproti NiCr rovnoměrněji rozloženy v objemu

povlaku. U tohoto materiálu byla naměřena porezita 2,4%. Na třetím, čtvrtém a pátém vzorku (viz obr. č. 29, 30 a 31) jsou použity v kombinaci na sobě dva povlaky, mezivrstva z NiTi je nanášena v různých tloušťkách na základní materiál, na ní je vždy nanášena funkční vrstva o stejné tloušťce. I v těchto případech bylo vyhodnoceno spojení povlaku se základním materiálem jako velmi dobré. Ve struktuře přídavného materiálu z ARC 502, který je nanášen na šestý vzorek (viz obr. č. 32) se objevuje větší množství pórů než v předchozích dvou přídavných materiálech. Mikrostruktura je v tomto povlaku relativně homogenní. Adheze vrstvy k základnímu materiálu je velice dobrá. U tohoto přídavného materiálu byla naměřena vyšší míra porezity 6,11%. Na sedmém, osmém a devátém vzorku (viz obr. č. 33, 34, 35) je opět kombinace dvou vrstev. Podkladová vrstva ARC 502 je nanášena v různých tloušťkách na základní materiál, na ní je nanášena funkční vrstva NiCr vždy o stejné tloušťce. I u těchto vzorků bylo z mikrostruktury jasně viditelné kvalitní spojení povlaku se základním materiálem. Na žádném ze vzorků nebyly v mikrostruktuře patrné žádné trhliny popř. vady, které by měly negativní vliv na vlastnosti povlaků a tedy i na jejich funkčnost.

12.1.2 Vyhodnocení pórovitosti povlaků

Vyhodnocení pórovitosti povlaku bylo provedeno na všech třech přídavných materiálech pomocí softwaru LUCIA. Fotky mikrostruktury povlaků byly do programu LUCIA nahrány. Následně bylo provedeno pět měření v různých tloušťkách vrstev na jednotlivých přídavných materiálech. Měření pórů v jednotlivých tloušťkách vrstev bylo zprůměrováno. Procentuální výskyt porezity byl vyhodnocen z vymezené plochy na fotkách při stonásobném zvětšení (viz obr. č. 36). Vyhodnocení pórovitosti je uvedeno v tabulce č. 4.



Obr. 36: Hodnocení pórovitosti pomocí softwaru LUCIA

Číslo vzorku	Parametry nástřiku				Porezita	
	I [A]	U [V]	p [MPa]	L [mm]	Póry [%]	Povlak [%]
1 - NiCr	180	30	0,5	180	4,02	95,98
2 - NiTi	150	30	0,5	150	2,4	97,6
6 - ARC 502	200	30	0,5	200	6,11	93,89

Tab. 4. Vyhodnocení pórovitosti vrstev

Pórovitost vlivem narůstající tloušťky vrstev v jednotlivých povlacích byla v tomto ohledu stejná. Je tedy možné usuzovat, že se stoupající tloušťkou vrstev zůstává pórovitost neměnná.

Největší množství pórů bylo vyhodnoceno v povlaku ARC 502 – 6,11%, což je u povlaku vytvořeného elektrickým obloukem velice příznivá hodnota, neboť vrstvy vytvořené touto metodou dosahují pórovitosti až 20%. Obecně míra pórovitosti zhoršuje kvalitu a snižuje tvrdost povrchů. Nicméně u tohoto povlaku byla naměřena největší povrchová tvrdost vrstvy i mikrotvrdost v příčném řezu povlaku. Je tedy možné, že došlo při hodnocení pórovitosti ke zkreslení měření.

12.2 Hodnocení abrazivní odolnosti materiálu

12.2.1 Metoda Dry Sand/Rubber Wheel test

K vyhodnocení odolnosti proti opotřebení u povlaků byla použita metoda Dry Sand/Rubber Wheel test dle ASTM-G65 (viz obr. č. 37). Zkoušku odolnosti proti opotřebení je nezbytné provést, neboť rozhoduje o životnosti povlaků a tedy i o životnosti součástí. Tato zkouška se používá pro simulaci za podmínek, které odpovídají provozním podmínkám, je vhodná pro modelování a hodnocení třibodového abrazivního opotřebení. Avšak úplné napodobení provozních podmínek není možné. Výsledky testu ukazují objemový úbytek nebo míru opotřebení v milimetrech krychlových. Princip zkoušky spočívá v tom, že se mezi ustavený zkušební vzorek a rotující ocelové kolo popř. kolo, které je opatřené po obvodu pryžovým materiálem o definované tvrdosti přivedou abrazivní částice o určité zrnitosti a tvrdosti, které způsobí opotřebení. Zkušební vzorek je ke stolu přitlačován přesně určenou silou. U této zkoušky se tedy sleduje snížení hmotnosti zkušební vzorku, který se pak přepočítává na objemový úbytek z toho důvodu, aby mohly být mezi sebou srovnávány i vzorky s rozdílnými hustotami. Menší objemový úbytek vykazují materiály s vyšší odolností proti abrazivnímu opotřebení. Snížení hmotnosti u vzorků se měří na digitálních vahách s přesností měření na 0,0001g.



Obr. 37: Metoda Dry Sand/Rubber Wheel test

12.2.1.1 Vyhodnocení metody Dry Sand/Rubber Wheel test

Měření bylo provedeno ve VZÚ PLZEŇ s.r.o. metodou Dry Sand/Rubber Wheel test dle ASTM-G65. Měřeny byly pouze vzorky s číselným označením 1, 2 a 6. Vzorek číslo 1 je pokryt funkční vrstvou z NiCr. Na vzorku číslo 2 je nanesena pouze podkladová vrstva z NiTi a na vzorku číslo 6 je jen samotná mezivrstva z přídavného materiálu ARC 502. Tyto vzorky byly vybrány kvůli tomu, aby byla patrná odolnost proti abrazi hlavní funkční vrstvy a také vrstev podkladových. Ostatní vzorky jsou kombinacemi těchto tří materiálů a z hlediska abrazivního opotřebení by nemělo jejich zkoušení význam.

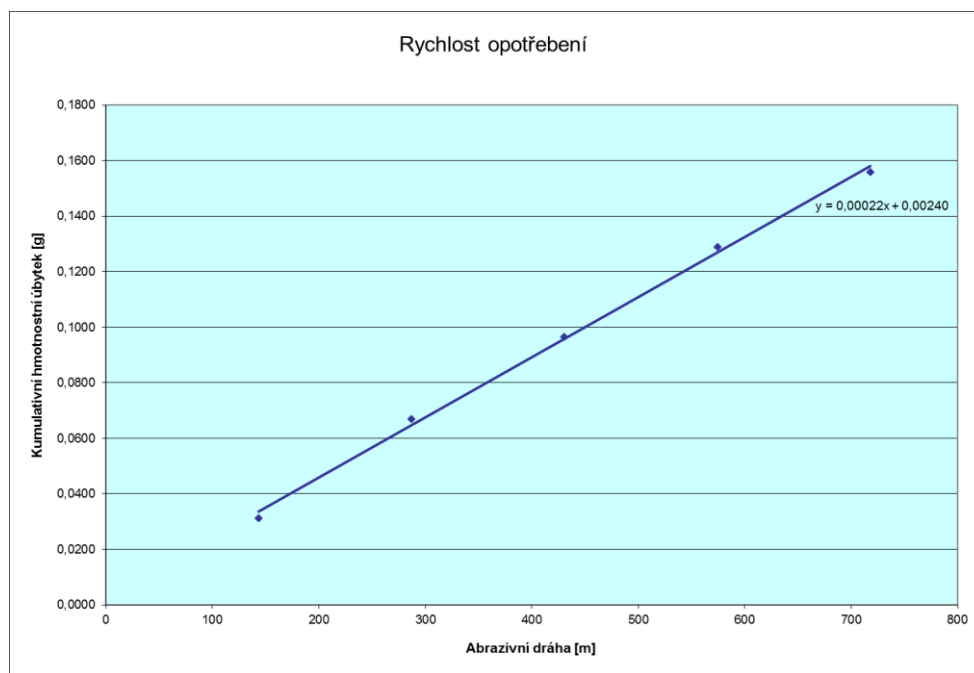
Před samotnou zkouškou byly zkušební vzorky nejprve zváženy na digitální váze, která měří s přesností na 0,0001 gramů. Každý vzorek se měřil třikrát po sobě, následně byl ustaven do zařízení a po ujetí dráhy kola 143,6 m byl zaznamenán úbytek hmotnosti přeměřením hmotnosti vzorku. Tímto způsobem bylo provedeno pět měření pro každý vzorek, z nichž byl určen aritmetický průměr.

Parametry zkoušky:

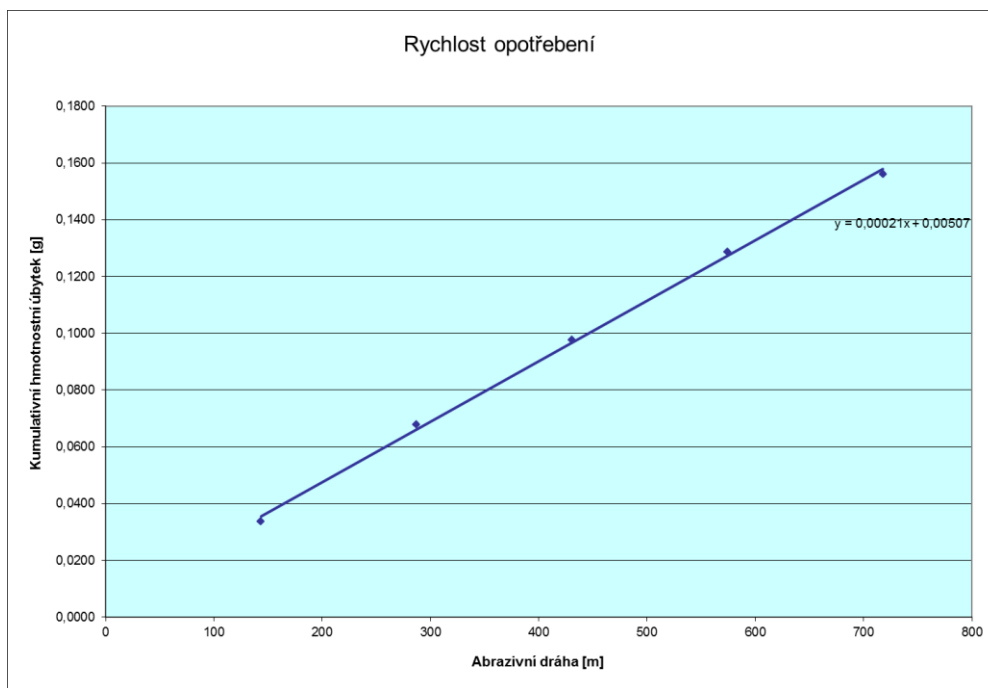
Průměr kola:	231,0808333	[mm]
Šířka kola:	12	[mm]
Tvrdost kola:	65 Shore A	
Abrazivo	Al ₂ O ₃ (200-300)	[μm]
Zatížení:	22	[N]
Proud písku:	500	[g/min]

Tab. 5: Parametry při zkoušce opotřebení metodou Dry Sand/Rubber Wheel test

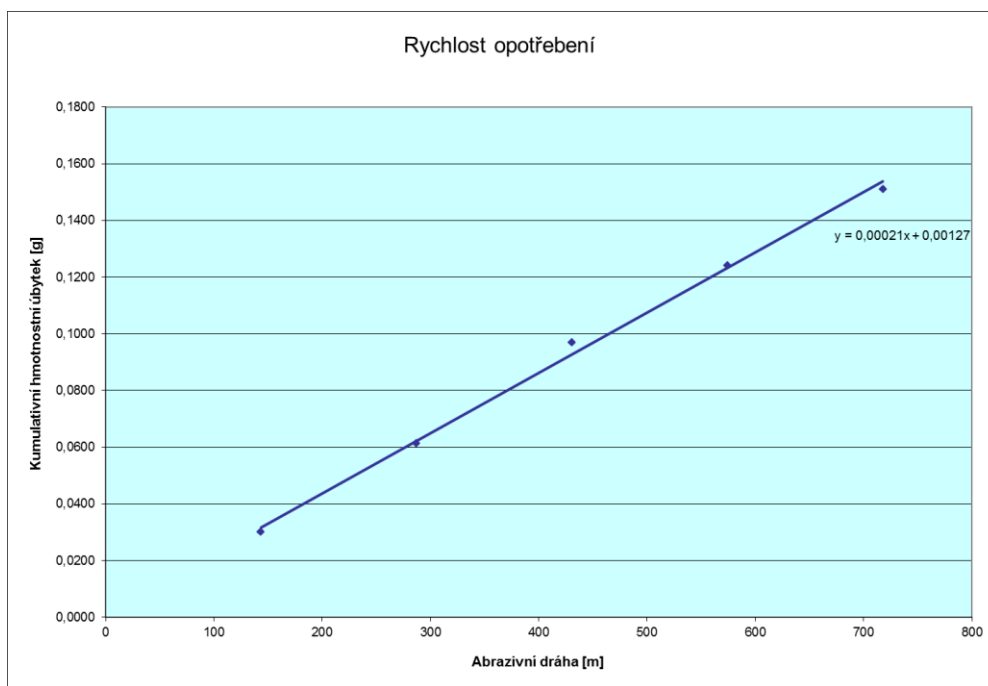
Během provedení zkoušek opotřebení nedošlo na žádném ze zkoušených vzorků při zatížení 22 N a při použití abraziva Al_2O_3 k odhalení substrátu. Nejvyšší odolnost proti opotřebení vykazuje povlak ARC 502, což ukazuje graf v závislosti kumulativního hmotnostního úbytku na abrazivní dráze (graf č. 2, 3, 4). Na tomto grafu je patrný nejmenší hmotnostní úbytek ve srovnání s ostatními povlaky. Povlak ARC 502 má i nejvyšší povrchovou tvrdost (HV 418) ze všech zkoušených povlaků, z čehož bylo možné usuzovat nejlepší odolnost proti abrazi právě u této vrstvy ještě před provedením zkoušky. Průměrná hodnota úbytku hmotnosti u funkční vrstvy NiCr, která je účinkům abrazivního prostředí v praxi hlavně vystavena je podobná jako u vrstvy NiTi, z čehož lze u těchto vrstev usuzovat podobný charakter odolnosti proti opotřebení. Výsledky této zkoušky ukazují, že je vhodnější pod funkční materiál použít podkladovou vrstvu z přídatného materiálu ARC 502, která je více odolná proti abrazi než podkladová vrstva z NiTi, neboť při odhalení funkční vrstvy může podkladová vrstva ještě stále chránit strojní součást proti opotřebení. Na obrázku (viz graf č. 5) je graf v závislosti kumulativního hmotnostního úbytku na abrazivní dráze, který ukazuje celkový přehled opotřebení jednotlivých vrstev.



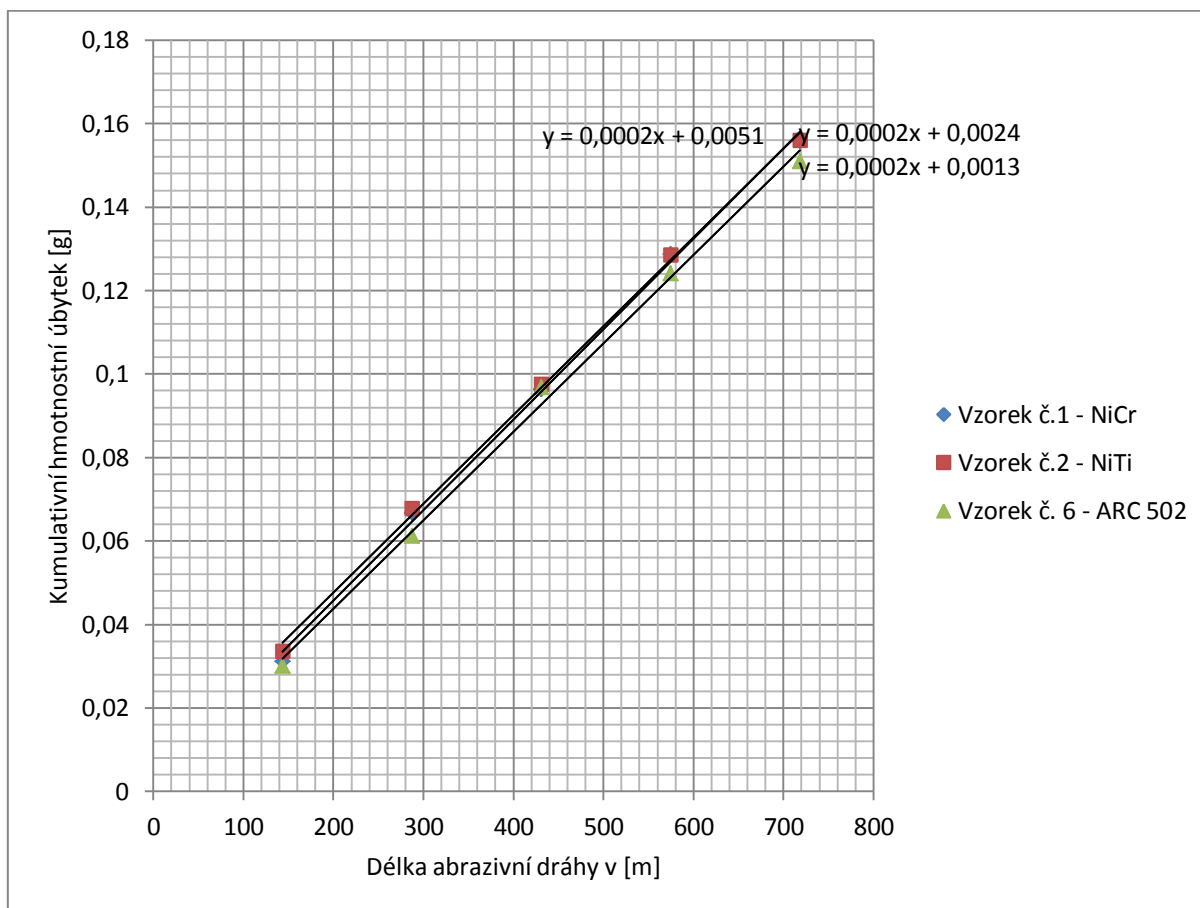
Graf 2: Opotřebení povlaku NiCr



Graf 3: Opotřebení povlaku NiTi



Graf 4: Opotřebení povlaku ARC 502



Graf 5: Celkový přehled opotřebení povlaků

12.2.2 Metoda PIN-on-DISC

Protože není zcela zřejmé, k jakému opotřebení u zkoumaných povlaků v provozu dochází, byla provedena tribologická analýza PIN-on-DISK. Tato analýza je vhodná pro hodnocení dvoubodového abrazivního opotřebení a kluzného tření. Metoda PIN-on-DISK umožňuje kromě stanovení koeficientu tření určit také míru a mechanismus opotřebení.

Princip této metody je založen na vtlačování tělíska (PIN) do materiálu předem definovanou silou. Zkoumaný materiál (DISC) rotuje a má nejčastěji tvar disku. Tělísko je buď v podobě nerotující kuličky nebo válečku. Nejčastěji se vyrábí z oceli nebo z korundu. Vtlačované tělísko do materiálu vytváří na povlaku kruhovou stopu, podle které se pak vyhodnocují tribologické vlastnosti. Zkouška se provádí na přístroji nazývaném tribometr, ke kterému je připojen počítač, v němž se nastavují otáčky a doba cyklu. [18]

Tedy, když dojde k určitému počtu cyklů tělíska pod definovaným zatížením, vyhodnotí se opotřebení z tribologické stopy, která vznikla v povlaku po tělísku. K vyhodnocení opotřebení se využívá elektronový řádkovací nebo světelný mikroskop. Profil tribologické stopy se vyhodnocuje buďto profiloměrem, nebo pomocí světelného mikroskopu s vhodným softwarem. [19].

12.2.2.1 Vyhodnocení metody PIN-on-DISC

Opotřebení materiálů touto metodou bylo provedeno na tribometru v univerzitním areálu na katedře Materiálu a strojírenské metalurgie.

Parametry tribologické zkoušky PIN-on-DISK:

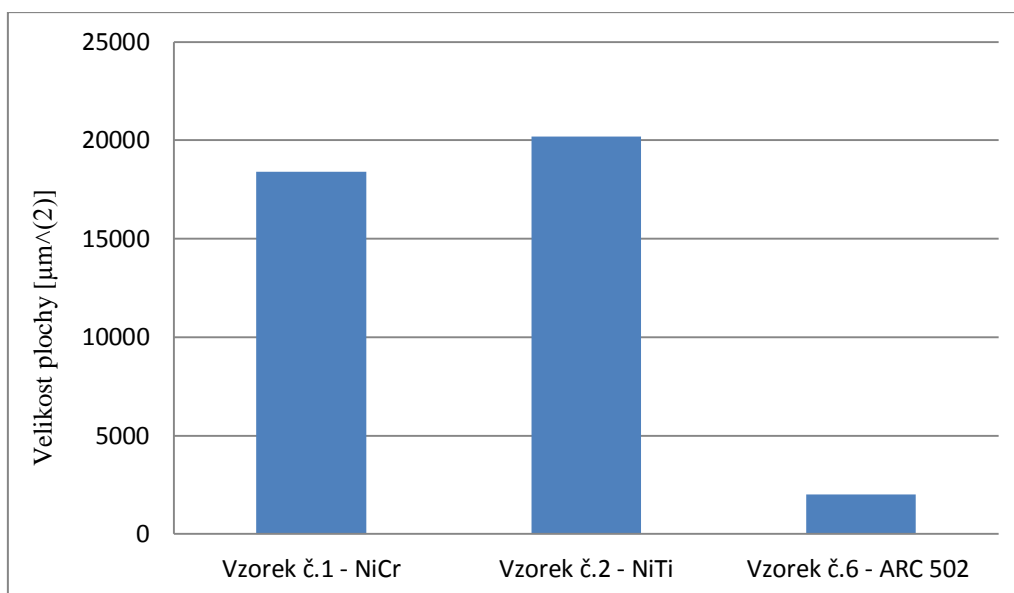
Počet cyklů	30 000
Otáčky [min ⁻¹]	252
Poloměr stopy [mm]	3
Zatížení [N]	10

Tab. 6: Parametry při zkoušce opotřebení metodou PIN-on-DISK

Tribologické stopy byly naměřeny na světelném mikroskopu Carl Zeiss Z1M. Tento mikroskop je vybavený softwarem AxioVision. Součástí softwaru byl modul Topography, kterým byl snímán a vyhodnocen profil povrchu materiálu.

Ze snímků byla vytvořena křivka, která popisuje profil stopy po tělísku. Pod touto křivkou byla vypočtena plocha odebraného materiálu v určitém místě z tribologické stopy. Měření bylo provedeno za čtyř míst tribologických stop a poté byl z jednotlivých ploch vypočten aritmetický průměr. Vypočtená plocha je ukazatelem rozsahu opotřebení materiálu.

Zkouška odolnosti proti opotřebení materiálu metodou PIN-on-DISK byla provedena na stejných povlacích jako v předchozím měření (kapitola 12.2.1.1).



Graf 6: Opotřebení povlaku po tribologické zkoušce PIN-on-DISK

Z předešlého obrázku (viz graf č. 6) je patrné nejnižší opotřebení u povlaku ARC 502, neboť zde byla odebrána nejmenší plocha materiálu z místa tribologické stopy. O několikanásobně horší opotřebení je viditelné u funkční vrstvy NiCr. Největší plocha pod křivkou z tribologické stopy byla vypočítána u povlaku NiTi, který se projevil jako povlak,

jenž se nejsnadněji opotřebovává. Povlak NiCr by měl vykazovat nejvyšší odolnost proti opotřebení, neboť se v praxi i při tomto experimentu aplikuje na strojní součásti, které jsou odolné proti opotřebení. Z měření však vyšel jako nejvíce odolný povlak proti opotřebení ARC 502, který je v práci použit jako mezivrstva pro zvýšení adheze a k doplnění rozměrů. Je tedy doporučeno používat tento povlak na součásti buďto jako hlavní funkční vrstvu, nebo v kombinaci funkční vrstvy z NiCr a mezivrstvy z ARC 502, který má v případě, že by došlo k prodření funkční vrstvy lepší výsledky opotřebení než povlak NiTi.

12.3 Zkouška tvrdosti

K hodnocení tvrdosti žárových nástřiků se obvykle používá zkouška dle Rockwella, která byla zpočátku měření použita. Vzhledem k tomu, že výsledky tvrdosti dle Rockwella vycházely na jednotlivých vzorcích velice rozdílné, přešlo se k měření tvrdosti podle Vickerse. Špatné výsledky naměřené tvrdosti byly ovlivněny pravděpodobně základním materiálem při vniku indentoru, neboť hloubka vtisku byla větší než desetina tloušťky povlaku.

K měření tvrdosti byl použit tvrdoměr typu Vickers (viz obr. č. 38). Měřeny byly úhlopříčky, které zanechal indentor ve zkušební vzorku po odlehčení zkušebního zatížení F.



Obr. 38: Tvrdoměr typu Vickers

12.3.1 Vyhodnocení tvrdosti

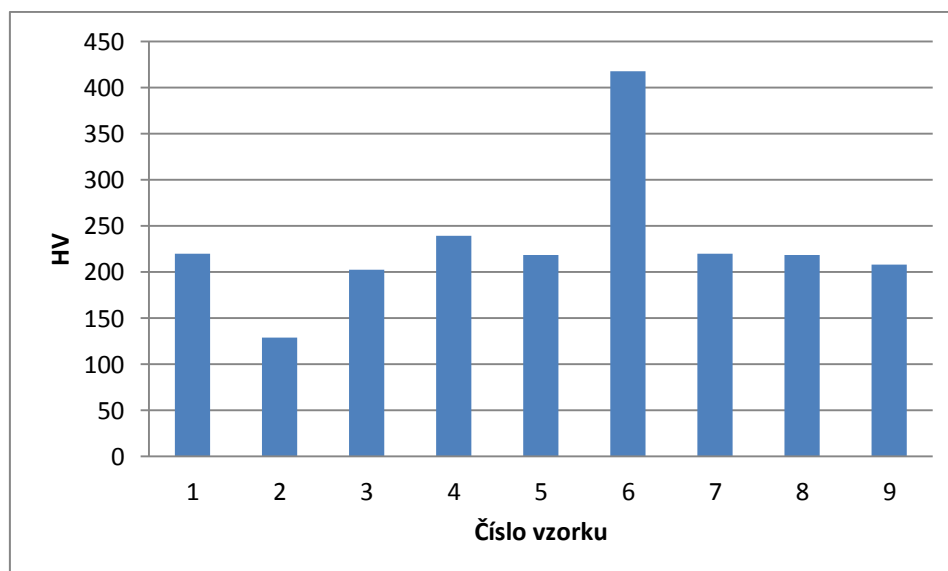
Tvrdot dle Vickerse byla měřena na povrchu vytvořených vrstev. Indentor ve tvaru čtyřbokého jehlanu byl vtlačován do povlaku se zatížením 30 kp (294,2 N), které působilo v kolmém směru v časovém intervalu 10s. Po odlehčení byly změřeny úhlopříčky vtisku.

Na každém vzorku bylo provedeno pět měření. Měřeny byly úhlopříčky, ze kterých byly následně podle vzorce vypočteny hodnoty tvrdosti pro každý vtisk. Vypočtené hodnoty

tvrdosti byly zprůměrovány aritmetickým průměrem. Výsledné hodnoty tvrdosti a jejich směrodatné odchylky jsou uvedené v tabulce č. 5.

Číslo vzorku	Číslo měření					Tvrdost HV
	1	2	3	4	5	
1	216	219	221	220	222	220 ± 1,9
2	132	138	128	120	126	129 ± 6,3
3	199	200	197	218	197	202 ± 8,1
4	233	235	253	238	238	239 ± 7,1
5	216	226	210	219	221	218 ± 5,3
6	370	376	481	399	463	418 ± 45,9
7	216	227	219	219	217	220 ± 3,7
8	220	221	218	212	222	219 ± 3,4
9	206	200	213	209	211	208 ± 4,9

Tab. 7: Tabulka naměřených hodnot tvrdosti povlaků – měření na povrchu



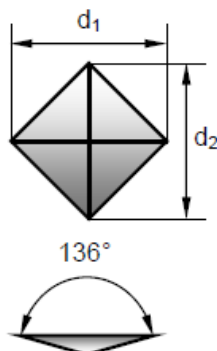
Graf 7: Tvrdost povrchových vrstev na jednotlivých vzorcích

Z naměřených výsledků vyplývá, že nejvyšší tvrdosti dosahuje vrstva, která byla vytvořena z přídavného materiálu s označením ARC 502 na vzorku číslo 6. Naopak nejmenší tvrdost povrchové vrstvy vykazuje povlak vytvořený z NiTi (viz vzorek č. 2), který je používán také jako podkladová vrstva. Naměřené hodnoty tvrdosti na funkční vrstvě z NiCr, která je nanesená na vzorku 3, 4, 5, 7, 8, 9 vyšly rozdílné, což může být způsobené např. odlišnými parametry nástřiku.

12.4 Zkouška mikrotvrdosti

Zkouška mikrotvrdosti je vhodná pro měření tvrdosti ve velmi malých objemech a byla zde použita pro měření žárových nástřiků. Vnikacím tělesem byl diamantový jehlan se čtvercovou základnou a vrcholovým úhlem 136°. Indentor byl do povlaku vtláčován se

zatížením 300g, které působilo po dobu 10 s v kolmém směru. Po odlehčení byly změřeny úhlopříčky vtisku.



Obr. 39: Vtisk provedený metodou podle Vickerse [20]

Mikrotvrdot jednotlivých vrstev HV0,3 byla vypočítána z úhlopříček d_1 a d_2 podle následujícího vztahu:

$$HV = 1,854 \cdot \frac{F}{d^2}$$

HV – tvrdost podle Vickerse

F – zkušební zatížení v [N]

d – průměrná úhlopříčka vtisku v [mm]

$$d = \frac{d_1 + d_2}{2}$$

12.4.1 Vyhodnocení mikrotvrdoti

Mikrotvrdot byla naměřena na příčných řezech u všech vzorků. Na jednotlivých vzorcích bylo v každé vrstvě (funkční i podkladové) vytvořeno pět vtisků Vickersovým indentorem. Také byla hodnocena mikrotvrdot samotného základního materiálu (ČSN 17 255). Byly proměřeny úhlopříčky, ze kterých byly následně vypočítané hodnoty mikrotvrdoti pro každý vtisk. Vypočtené hodnoty mikrotvrdoti byly zprůměrovány aritmetickým průměrem. Konečné hodnoty mikrotvrdoti HV0,3 a jejich směrodatné odchylky jsou uvedené v tabulce č. 8.

Hodnoty měřené na povrchu povlaku a v řezu nelze mezi sebou porovnávat vzhledem k charakteristické anizotropii povlaků.

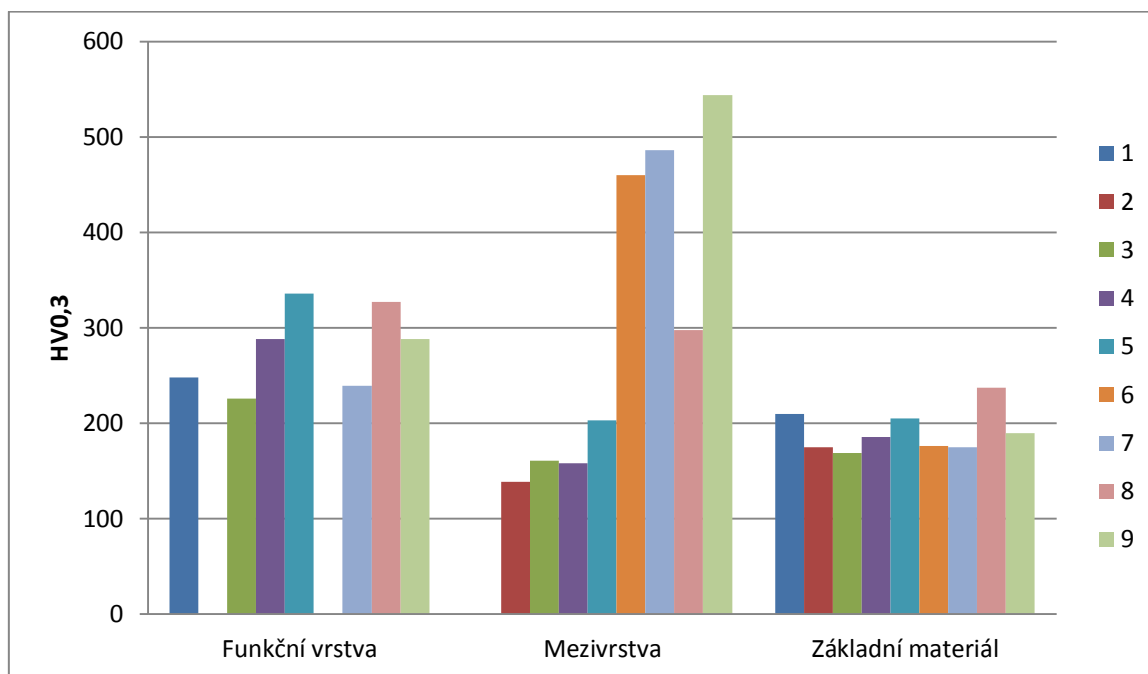
Měřením mikrotvrdoti bylo sledováno, jak se mění mechanické vlastnosti vrstev v závislosti na přibývajících tloušťkách povlaků. Při měření mikrotvrdoti musela být uvažována rozdílnost chemického složení přídatných materiálů, z kterých byly vrstvy vytvořeny. Proto jsou zde porovnány jen mechanické vlastnosti (mikrotvrdoti) mezi jednotlivými přídatnými materiály. Nárůst či pokles tvrdostí v závislosti na různých tloušťkách povlaků je znázorněno v grafu č. 8.

Číslo vzorku	Funkční vrstva		Mezivrstva		Základní materiál
	HV _{0,3}	Tloušťka vrstvy [mm]	HV _{0,3}	Tloušťka vrstvy [mm]	HV _{0,3}
1	248 ± 29	0,4	-	-	210 ± 6
2	-	-	139 ± 18	0,4	175 ± 3
3	226 ± 24	0,4	161 ± 36	0,4	169 ± 4
4	288 ± 41	0,4	158 ± 18	0,8	186 ± 7
5	336 ± 13	0,4	203 ± 16	1,1	205 ± 8
6	-	-	460 ± 184	0,4	176 ± 3
7	239 ± 73	0,4	486 ± 143	0,4	175 ± 3
8	327 ± 31	0,4	298 ± 48	0,8	237 ± 9
9	288 ± 16	0,4	544 ± 74	1,1	190 ± 2

Tab. 8: Hodnoty mikrotvrdomosti HV_{0,3} a jejich směrodatné odchylky

Nejvyšší hodnota mikrotvrdomosti byla naměřena u povlaku ARC 502 při tloušťce vrstvy 1,1 mm, na kterém byl ještě nanesen funkční povlak NiCr. Naopak nejmenší tvrdosti dosahoval povlak NiTi o tloušťce vrstvy 0,4 mm, který byl na základní materiál nanesen bez funkční vrstvy.

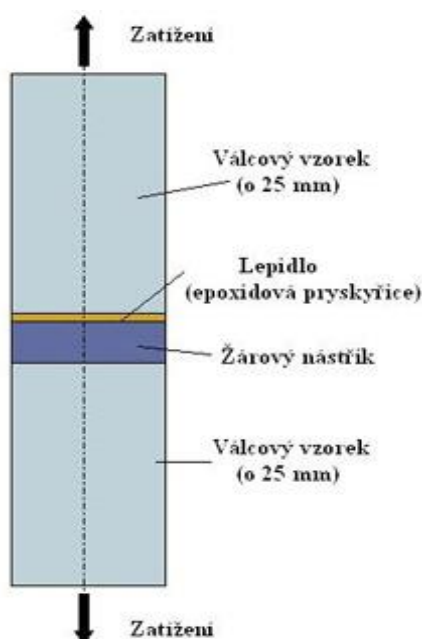
Kromě hodnot na čtvrtém a osmém vzorku, kdy tvrdosti poklesly při tloušťce vrstev 0,8 mm, byly v ostatních případech zaznamenány zvyšující se hodnoty tvrdostí s narůstající tloušťkou vrstev.



Graf 8: Hodnoty tvrdostí v závislosti na různých tloušťkách povlaků

12.5 Hodnocení adhezivní pevnosti

K hodnocení přilnavosti vrstev k základnímu materiálu se používá tzv. zkouška přilnavosti. Zkouška se provádí tak, že se na čele válcového vzorku vytvoří žárový nástřík, na tuto vrstvu se nalepí protikus válcového vzorku a tento systém je pak namáhán tahem podobně jako klasická zkouška tahem za pokojové teploty (viz obr. č. 40). Zkouška se kromě stanovení pevnosti spoje mezi vrstvou a základním materiálem dále používá pro stanovení pevnosti povlaku, k vyhodnocení vlivu základního materiálu a přídavného materiálu, dále k úpravě povrchu a podmínek procesních parametrů a také se využívá pro kontrolu správného vytvoření žárového nástříku. Zkouška je definována normou ASTM 633-69 (ČSN EN 582). [21]



Obr. 40: Stanovení přilnavosti v tahu [5]

Během vyhodnocování přilnavosti vrstev k základnímu materiálu se vyskytují určité problémy, které souvisejí s druhem použitého lepidla. U povlaků, které mají vysokou hodnotu přilnavosti (HVOF, D-Gun) dochází během testování k předčasnému odtrhnutí lepidla od vzorku, tzn., že pevnost lepeného spoje je nižší než pevnost mezi vrstvou a základním materiálem. Další problém, který znehodnocuje výsledky testu, se vyskytuje u porézních materiálů. Do pórů proniká lepidlo a tím znehodnocuje vlastnosti vytvořeného povlaku.

Hodnoty pevnosti jsou ovlivněny průměrem a délkou zkušebního vzorku a také tloušťkou povlaku, neboť mají vliv na rozložení napětí v povlaku. [5], [21]

Přilnavost v tahu R_H je síla zjištěná zkouškou tahem, vypočítaná jako podíl maximálního zatížení F_m a průřezu vzorku v místě lomu. Po přetržení vzorků se vyhodnocuje, jestli došlo k přerušení spoje v lepidle, to by znamenalo, že povlak by měl vyšší adhezi než lepidlo popřípadě na rozhraní povlak - základní materiál (adhezivní porušení) či uvnitř povlaku (kohezivní porušení). Porušení může být i kombinací konečných dvou případů (adhezivně-kohezivní porušení), které se vyhodnocuje z lomové plochy jako podíl adhezivního a kohezivního porušení. [22] Pro vyhodnocení se použijí pouze výsledky z těch vzorků, u kterých k lomu dojde na rozhraní nástříkaného povlaku s podkladovým kovem nebo

uvnitř nastříkaného povlaku. Pokud k lomu dojde v lepeném spoji, vzorek se nezahrne do výpočtu průměrné hodnoty přilnavosti v tahu. [21]

12.5.1 Vyhodnocení adhezivní pevnosti

Přilnavost povlaků neboli také adhezivní pevnost byla hodnocena dle normy ČSN EN 582 v areálu ZČU na katedře KMM na universálním stroji pro statickou zkoušku tahem (viz obr. č. 41). K celému zařízení je připojen počítač, který zaznamenává průběh napětí a prodloužení. Adhezivní pevnost byla vyhodnocena celkem na 27 válcových vzorcích. Bylo vyrobeno 9 sad po 3 kusech. Každá sada odpovídala 1 typu materiálu povlaku. Počet vzorků pro 1 sadu byly 3 kusy, což odpovídá minimálnímu počtu vzorků pro stanovení přilnavosti v tahu 1 typu materiálu. Vzorky nesměly být v opracovaném stavu a musely splňovat zaručenou rovinnost a rovnoběžnost protilehlých čel. Slepění válcových vzorků k sobě bylo provedeno pomocí speciálního lepidla BELZONA 1111 (Super Metal), který se využívá k opravám a inovacím strojů a zařízení. Lepidlo se vytvrzovalo 12 hodin při teplotě 25°C. Po vytvrzení a zajištění symetrického upnutí adhezivního spoje byla provedena zkouška tahem v souladu s normou EN 10002-2. K přetržení slepených spojů došlo na trhacím stroji s rychlostí zatěžování 10mm/min. Naměřené hodnoty maximálního zatížení a meze pevnosti na jednotlivých vzorcích, při kterých došlo k přetržení lepeného spoje, jsou uvedeny v tabulce č. 9.



Obr. 41: Universální stroj pro statickou zkoušku tahem

Číslo vzorku	Měření č. 1			Měření č. 2			Měření č. 3			Statická průměrná hodnota přilnavosti v tahu R_H
	F [kN]	R _m [MPa]	R _H [MPa]	F [kN]	R _m [MPa]	R _H [MPa]	F [kN]	R _m [MPa]	R _H [MPa]	
1	34,1	27,2	-	36,0	28,6	-	35,2	27,9	-	-
2	37,6	29,9	150,6	23,3	18,6	-	30,5	24,3	175,2	162,9
3	26,8	21,3	-	7,8	6,1	-	24,5	19,3	-	-
4	29,9	23,8	-	19,3	15,4	-	22,8	18,2	-	-
5	30,2	24,0	-	21,0	16,7	-	26,6	21,3	-	-
6	27,3	21,8	78,9	21,7	17,3	-	24,4	19,6	-	78,9
7	34,0	27,1	-	4,5	3,6	-	29,3	22,8	-	-
8	26,8	21,3	-	25,2	20,0	-	26,5	21,7	-	-
9	22,0	17,5	-	19,2	11,4	-	20,9	13,6	-	-

Tab. 9: Hodnoty maximálního zatížení a meze pevnosti v tahu na jednotlivých vzorcích

Dle normy ČSN EN 582 byla vypočtena statická průměrná hodnota přilnavosti v tahu R_H pouze na druhém a šestém vzorku. U všech ostatních vzorků došlo během zkoušek přilnavosti k destrukci lepeného spoje. K porušení lepených spojů došlo při nižších zatížení, než byla teoretická pevnost lepidla. Adhezivní pevnost povlaku byla tedy vyšší, než pevnost lepidla.

Přilnavost povlaků k základním materiálům byla vyhodnocena tahovou zkouškou. Hodnoceny byly povlaky vytvořené třemi přídatnými materiály v různých tloušťkách.

Na prvním vzorku byla nanášena funkční vrstva NiCr o tloušťce 0,4 mm. Vzhledem k tomu, že došlo při všech měření k porušení spoje v lepidle, lze konstatovat, že adhezivní pevnost vrstvy k základnímu materiálu je vyšší, než je průměrná hodnota R_m u třech měření, což je 28 MPa.

Na druhém vzorku je nanášen povlak z NiTi, tloušťka vrstvy 0,4 mm. Spoj s touto vrstvou byl během tahové zkoušky při prvním měření porušen při zatížení $F = 37,6$ kN a při pevnosti $R_m = 29,9$ MPa na rozhraní mezi nastříkaným povlakem a podkladovým materiálem. Z průřezu vzorku v místě, kde došlo k odtržení povlaku, byla stanovena plocha (viz obr. č. 42). Přilnavost v tahu R_H byla vypočtena jako podíl maximálního zatížení a průřezu vzorku v místě lomu. Ke stejnému porušení spoje na rozhraní mezi vrstvou a základním materiálem došlo při třetím měření. I zde byla stanovena přilnavost v tahu R_H . Statická průměrná hodnota přilnavosti v tahu povlaku NiTi byla vypočtena jako průměrná hodnota z jednotlivých měření. U této vrstvy měla hodnotu $R_H = 162,9$ MPa. Podkladová vrstva NiTi nemá dobrou přilnavost, pokud je nanášena na základní materiál samotná bez funkční vrstvy.



Obr. 42: Porušení povlaku NiTi (vzorek č. 2) na rozhraní mezi nastříkaným povlakem a podkladovým materiálem

K porušení spoje u třetího vzorku, na kterém byla nanesená mezivrstva z NiTi o tloušťce 0,4 mm a funkční vrstva z NiCr o stejné tloušťce došlo při všech měření k porušení v lepeném spoji. Během prvního měření došlo k přetržení spoje při $R_m = 21,3$ MPa. Při druhém měření se tato hodnota výrazně zmenšovala, což mohlo být způsobeno špatným rozmícháním základní složky a tvrdidla, u lepidla. Průměrná hodnota, při které došlo k destrukci lepeného spoje, byla $R_m = 15,6$ MPa, to znamená, že povlak má lepší adhezivní pevnost k základnímu materiálu, než je tato hodnota.

U čtvrtého vzorku došlo opět k porušení lepeného spoje při všech měření. Na vzorku byly nanесeny stejné vrstvy, jako v předchozím případě jen s rozdílnou tloušťkou mezivrstvy, která byla 0,8 mm. Průměrná hodnota, kdy se lepený spoj porušil, byla $R_m = 19,1$ MPa.

Na pátém vzorku byla nastříkaná mezivrstva z NiTi o tloušťce 1,1 mm a funkční vrstva z NiCr o tloušťce 0,4 mm. Ani zde se nepodařilo při měření přetřhnout válečkový spoj mezi vrstvou a základním materiálem. Průměrná hodnota, při které došlo k destrukci lepeného spoje, byla $R_m = 20,7$ MPa. Tedy i při celkové tloušťce povlaku (1,5 mm) nedocházelo k porušení adheze mezi dvěma na sobě ulpělými vrstvami ani na rozhraní podkladové vrstvy a základního materiálu.

Na šestém vzorku byl nanесený povlak vytvořený z přídavného materiálu ARC 502 o tloušťce vrstvy 0,4 mm. Během tahové zkoušky došlo při prvním měření k porušení spoje na rozhraní mezi nastříkaným povlakem s podkladovým kovem při zatížení $F = 27,3$ kN a při pevnosti $R_m = 21,8$ MPa. Při dalších měření byl spoj porušován v lepidle, proto nebyly výsledky zahrnuty do výpočtu průměrné statické hodnoty přilnavosti v tahu. Výsledná přilnavost v tahu vyšla u povlaku $R_H = 78,9$ MPa. Tato podkladová vrstva, pokud je nanесena samotná na základní materiál, nevykazuje dobrou adhezivní pevnost.

Při všech měření proběhla destrukce spojů u sedmého vzorku v lepeném spoji. Zde byly nanесeny dvě vrstvy. Mezivrstva z ARC 502 o síle 0,4 mm a funkční vrstva z NiCr o stejné tloušťce. Během prvního měření došlo k porušení spoje při $R_m = 27,1$ MPa. Při druhém měření poklesla pevnost na $R_m = 3,6$ MPa. Tento pokles byl pravděpodobně způsobený špatným odmaštěním povrchu podkladového dílce, také mohlo dojít ke špatnému promíchání, popřípadě byl určen špatný poměr tvrdidla a základní složky lepidla. Průměrná hodnota, kdy došlo k porušení lepeného spoje, byla $R_m = 17,8$ MPa. Přilnavost povlaku ARC 502 k základnímu materiálu vykazuje větší hodnotu než je 17,8 MPa.

Na osmém vzorku byla hodnocena adhezivní pevnost stejných vrstev jako u předešlého vzorku, jen tloušťka vrstvy podkladového materiálu ARC 502 byla v tomto případě 0,8 mm. Tloušťka vrstvy NiCr zůstala zachovaná 0,4 mm. Ani u takto silné vrstvy (1,2 mm) nedošlo k odtržení povlaku od základního materiálu. K porušení spoje došlo při všech měření opět v lepeném spoji při $R_m = 21$ MPa.

Stejně jako v předchozím případě dopadlo i měření na devátém vzorku. Opět došlo při všech měření k porušení v lepeném spoji. Znamená to, že adhezivní pevnost mezi vrstvami a mezi podkladovou vrstvou a základním materiálem je větší než průměrná hodnota pevnosti lepidla, při které došlo k destrukci spoje. Tedy i při největší tloušťce vrstvy (1,5 mm) nedošlo k porušení přilnavosti povlaku.

13 Diskuze výsledků

Úkolem této práce bylo přinést informace o tom, jak tlusté vrstvy přídavných materiálů je možné na strojní součásti nanášet, aniž by docházelo k výraznějšímu ovlivnění funkčních vlastností povlaků. Na zkušební vzorky byly nanášeny tři různé přídavné materiály (NiCr, NiTi, ARC 502) o různých tloušťkách, které se používají jako ochranné povlaky všude tam, kde je zapotřebí chránit strojní součásti proti opotřebení a korozi (energetika, petrochemie). Tyto povlaky se také používají k doplnění rozměrů v oblasti renovací.

Hlavním kritériem pro hodnocení adhezivní pevnosti různých tlouštěk povlaků k substrátu byla zkouška přilnavosti. Mechanické vlastnosti vrstev byly v závislosti na tloušťce také hodnoceny pomocí mikrostruktury vytvořených povlaků, povrchové tvrdosti a mikrotvrdosti vrstev hodnocených na metalografických příčných výbrusech. Dále byla na povlacích sledována odolnost proti opotřebení a vyhodnocena pórovitost.

Metalografie

První měření, které bylo provedeno, bylo hodnocení mikrostruktury povlaků na metalografických příčných výbrusech. Mikrostruktura byla vyhodnocena na všech čtvercových vzorcích v příčných řezech. Hodnocení mikrostruktury vrstev nám přineslo určité informace o vlastnostech povlaků. Na příčných výbrusech byla vyhodnocena kvalita rozhraní mezi vrstvou a základním materiálem, homogenita a pórovitost povlaku i možné vady, které se mohly ve struktuře povlaků vyskytnout.

Ačkoliv byla největší tloušťka mezivrstev 1,1 mm, míra pórovitosti v tomto ohledu byla pořád stejná. Z toho lze usuzovat, že se stoupající tloušťkou vrstev, zůstává pórovitost neměnná. Bylo však předpokládáno, že porezita bude s rostoucí tloušťkou vrstev klesat, neboť měření mikrotvrdosti bylo prokázáno, že se vzrůstající tloušťkou vrstev rostla i měřená mikrotvrdost.

Přestože u povlaku ARC 502 byly naměřeny nejlepší vlastnosti (mikrotvrdost, odolnosti proti opotřebení) z hodnocených povlaků, byla v této vrstvě naměřena největší míra pórovitosti, která vede ke zhoršení kvality a ke snížení tvrdosti povlaků. Tento fakt však s naměřenými hodnotami mikrotvrdosti nekorespondoval. Z tohoto měření lze konstatovat, že vyšší míra pórovitosti byla u tohoto povlaku způsobena pravděpodobně špatným vyhodnocením pórovitosti. Mohlo dojít např. k uvolnění tvrdých částic při řezání vzorku, kdy se známky po vypadnutých částicích mohly jevit jako póry, které vyhodnocenou pórovitost zvyšují.

Shrnutí hodnocení mikrostruktury

Hodnocením mikrostruktury zároveň stříkaných povlaků na příčných výbrusech bylo zjištěno: Na žádném ze zkušebních vzorků nebyly pozorovány trhliny v celém objemu povlaku ani na rozhraní mezi povlakem a základním materiálem. Všechny hodnocené povlaky byly na základě rozdílných tlouštěk povlaků dobře ukotveny k základnímu materiálu. Deformované částice, nenatavené nebo jen částečně natavené částice, oxidy a póry byly poměrně rovnoměrně rozloženy v celém objemu povlaku u všech materiálů.

Opotřebení materiálů

Jako další měření bylo provedeno hodnocení abrazivní odolnosti materiálů. Vzhledem k neznalosti prostředí, ve kterém se nanosené povlaky opotřebovávají, byly zvoleny dvě metody hodnocení opotřebení. Metoda Dry Sand/Rubber Wheel test je určena pro hodnocení odolnosti materiálu při tří-tělesovém abrazivním zatížení povrchu. Metoda PIN-on-DISK je vhodná pro stanovení dvou-tělesového abrazivního opotřebení.

Odolnost proti opotřebení bylo provedeno jen na vzorcích, na kterých byly nanoseny samotné povlaky z NiCr, NiTi a ARC 502. Tyto vzorky byly vybrány kvůli tomu, aby byla patrná odolnost proti opotřebení hlavní funkční vrstvy a také vrstev podkladových, kdyby došlo k prodření funkční vrstvy.

Dry Sand/Rubber Wheel test

Během hodnocení abrazivní odolnosti materiálů pomocí metody Dry Sand/Rubber Wheel test nedošlo na žádném ze zkoušených vzorků při zatížení 22 N a při použití abraziva Al_2O_3 ani v jednom cyklu k odhalení substrátu. Průběhy rychlosti opotřebení jsou na základě grafů, viz graf č. 2, 3, 4 podobné. Přesto jsou patrné malé rozdíly (graf č. 5). Nejvyšší odolnost proti opotřebení byla zaznamenána u povlaku ARC 502, neboť zde docházelo k nejmenšímu hmotnostnímu úbytku a rovnice grafu ukazovala nejvyšší hodnotu. U povlaku ARC 502 byla naměřena i nejvyšší tvrdost ze všech zkoušených povlaků, z čehož bylo možné usuzovat nejvyšší odolnost proti abrazi právě u této vrstvy. Hmotnostní úbytek u povlaku NiTi je ve srovnání s povlakem NiCr zpočátku zkoušky opotřebení menší, z čehož lze usuzovat lepší odolnost proti opotřebení u tohoto povlaku. Ve čtvrtém cyklu, po ujetí dráhy kola 574,4 m jsou průběhy rychlostí opotřebení u těchto dvou povlaků téměř totožné. Jako nejméně odolný povlak proti abrazivním účinkům se prokázal u funkční vrstvy NiCr.

Pin on disk

Měřením opotřebení povlaků tribologickou zkouškou PIN-on-DISK jsme dosáhli podobných výsledků jako v případě hodnocení opotřebení zkouškou Dry Sand Rubber/Wheel test. Nejmenší plocha materiálu z místa tribologické stopy byla odebrána z povlaku ARC 502 (viz graf č. 6), který se prokázal jako nejvíce odolný proti opotřebení. O několikanásobně horší opotřebení bylo naměřeno u funkční vrstvy NiCr. Povlak NiTi vyšel z této tribologické zkoušky jako povlak, u kterého došlo k největšímu opotřebení.

Shrnutí odolnosti proti opotřebení

Simulace opotřebení, kdy se mezi dvě opotřebovávané součásti dostávají ještě tvrdé částice, představuje metoda Dry Sand Rubber/Wheel test. Měřením odolnosti proti opotřebení metodou Dry Sand Rubber/Wheel test byl zjištěn podobný charakter opotřebení u všech povlaků. Přesto jako nejvíce odolný povlak proti abrazivnímu opotřebení vyšel povlak ARC 502, po něm NiTi a jako nejméně odolný povlak NiCr.

Z tribologické zkoušky PIN-on-DISK se jevil rovněž jako nejvíce odolný povlak proti dvou-tělesové abrazi ARC 502, což koresponduje s největší naměřenou mikrotvrdostí u tohoto povlaku. Na druhou stranu byla u povlaku naměřena největší míra pórovitosti (6,11%), která neprokázala zhoršení vlastností povlaků. Několikanásobně horší opotřebení oproti povlaku ARC 502 vykazoval povlak NiCr a jako nejméně odolný vyšel povlak NiTi.

Z obou metod hodnocení opotřebení materiálů vyplývá, že v prostředí, kde je strojní součást vystavena tří-tělesovému i dvou tělesovému opotřebení, je vhodnější použít pod funkční vrstvu povlak ARC 502, u kterého došlo k nejmenšímu opotřebení v obou hodnotících metodách. Neboť v případě, že by došlo k odhalení funkční vrstvy NiCr, může podkladová vrstva ještě stále chránit strojní součást proti opotřebení. Při zkouškách opotřebení nedocházelo ani v jednom případě k odlupování vrstev. Tloušťka vrstev v tomto ohledu neměla vliv na opotřebení povlaků, neboť k opotřebení strojních součástí dochází v provozním prostředí pouze na povrchové vrstvě.

Tvrдост

Další hodnocení mechanických vlastností povlaků bylo provedeno měření tvrdosti na povrchu vrstev. Nejvyšší tvrdost dosahovala vrstva vytvořená z přídatného materiálu ARC 502 (HV 418). Tento přídatný materiál se používá jako podkladová vrstva ke zvýšení adheze funkční vrstvy a v porovnání s ostatními materiály vykazuje nejlepší vlastnosti. Naopak nejmenší tvrdost byla naměřena v povlaku vytvořeného z NiTi (HV 129). Hodnoty tvrdosti hlavní funkční vrstvy z NiCr byly naměřeny na vzorcích s označením 1, 3, 4, 5, 7, 8, 9. Hodnoty se od sebe mírně lišily (HV 220, 202, 239, 218, 220, 219, 208). Rozdílnost naměřených tvrdostí na povlaku NiCr mohla být způsobená např. odlišnými parametry při nástřiku.

Mikrotvrдост

Tvrдост povrchové vrstvy byla naměřena jako nejmenší u povlaku vytvořeného z materiálu NiTi (vzorek č. 2). I mikrotvrдост, která byla vyhodnocena na příčném řezu povlakem, byla u tohoto povlaku naměřena jako nejmenší ze všech materiálů. Z naměřených hodnot, byl zaznamenán mírný nárůst mikrotvrдостi v povlaku NiTi s postupnou přibývajícím tloušťkou vrstvy (viz graf č. 9). Na druhém vzorku byla nanášena samotná vrstva z NiTi, mikrotvrдост zde dosahovala hodnoty HV_{0,3} 139. Při nanášení funkční vrstvy NiCr na podkladovou vrstvu z NiTi došlo ke zvýšení tvrdosti podkladové vrstvy na hodnotu HV_{0,3} 161. Tloušťka této vrstvy byla 0,4 mm. Při dalším měření (vzorek č. 3) došlo k mírnému poklesu tvrdosti. Tloušťka podkladové vrstvy vzrostla na 0,8 mm. Při tloušťce vrstvy 1,1 mm došlo opět ke zvýšení tvrdosti na hodnotu HV_{0,3} 203 (vzorek č. 5). Vzdávající hodnota tvrdosti mohla být způsobená např. vneseným napětím při vytváření žárových povlaků. U hodnot tvrdostí naměřených na příčných řezech u funkčních vrstev NiCr, které byly nanášeny na podkladové vrstvy NiTi, byl zaznamenán rovněž nárůst tvrdosti s přibývajícím tloušťkou podkladových vrstev. Avšak v rámci směrodatné odchylky byly tvrdosti této funkční vrstvy většinou podobné.

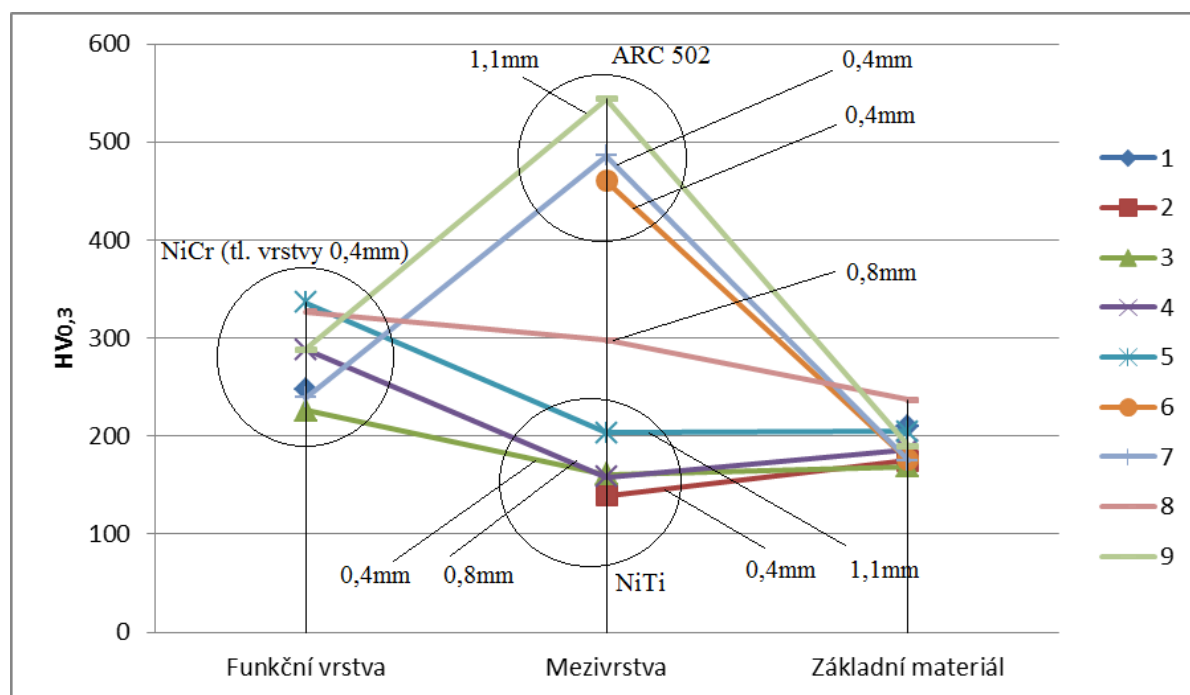
Na povlaku vytvořeného z ARC 502 byla naměřena nejvyšší tvrdost na povrchu povlaku i mikrotvrдост v příčném řezu. Na této vrstvě byl zaznamenán stejně jako u povlaku NiTi nárůst tvrdosti s přibývajícím tloušťkou vrstvy. Samotný povlak ARC 502 bez funkční vrstvy byl nanášen na šestý vzorek. Tvrдост zde dosáhla hodnoty HV_{0,3} 460 při tloušťce vrstvy 0,4 mm. Při stejné tloušťce vrstvy NiTi a při nanášení na tuto vrstvu funkční povlak, vzrostla hodnota tvrdosti na HV_{0,3} 486 (vzorek č. 7). Při dalším zvýšení tloušťky podkladové vrstvy na 0,8 mm tvrdost podstatně klesla na HV_{0,3} 298 (vzorek č. 8). Což mohlo být způsobené odlišnými parametry u nástřiku. Například rozsah depoziční vzdálenosti byl u povlaku ARC 502 od 180 do 200 mm, což v případě překročení této vzdálenosti mohlo vést ke snížení tvrdosti povlaku. Hodnota mikrotvrдостi v poslední vrstvě o tloušťce 1,1 mm narostla na HV_{0,3} 544. Tvrдостi vyhodnocené na funkčních vrstvách NiCr nanášené na

mezivrstvy ARC 502 se měnily skokově. Byly naměřeny i hodnoty tvrdostí v základním materiálu na jednotlivých vzorcích. Průměrná hodnota tvrdosti na podkladovém kovu byla HV_{0,3} 191.

Shrnutí hodnocení mikrotvrdosti

Hodnocením mikrotvrdosti různých přídatných materiálů, bylo sledováno, jaký vliv má přibývající tloušťka povlaků na mechanické vlastnosti vrstev.

Měřením bylo zjištěno, že s přibývající tloušťkou vrstev podkladových materiálů NiTi a ARC 502 narůstají hodnoty tvrdosti v těchto vrstvách. Nejvyšší hodnoty mikrotvrdosti bylo dosaženo v povlaku ARC 502 při tloušťce vrstvy 1,1 mm, na kterém byla nanesena funkční vrstva NiCr. Naopak nejmenší hodnota tvrdosti byla naměřena na samotném povlaku NiTi při tloušťce vrstvy 0,4 mm.



Graf 9: Nárůst a pokles hodnot tvrdosti v závislosti na různých tloušťkách povlaků

Adhezivní pevnost povlaků

Hodnoty adhezivních pevností dosahují u žárových nástřiků vytvořených elektrickým obloukem hodnot v rozmezí od 10 do 40 MPa.

Během zkoušek adhezivní pevnosti žárových nástřiků došlo k porušení na rozhraní mezi nástřikem a podkladovým materiálem pouze na samotných mezivrstvách NiTi a ARC 502 bez funkčních vrstev (vzorek č. 2 a 6). U všech ostatních zkušebních vzorků došlo během zkoušek přilnavosti k destrukci lepeného spoje. K porušení lepených spojů došlo při nižších zatížení, než byla teoretická pevnost lepidla. Adhezivní pevnost povlaků k základním materiálům byla tedy vyšší, než pevnost lepidla, při kterém došlo k přetržení.

Vrstvy, u kterých došlo k porušení lepeného spoje mezi povlakem a podkladovým materiálem, nemají příliš dobrou adhezivní pevnost k základnímu materiálu. Jedná se však o vrstvy vytvořené z NiTi a ARC 502, které se při tomto experimentu používají jen jako podkladové vrstvy ke zvýšení adheze hlavní funkční vrstvy NiCr. V kombinaci podkladové a

funkční vrstvy již k odtržení povlaků od základního materiálu nedocházelo. Všechny vrstvy mimo povlaků NiTi a ARC 502 vytvořených na druhém a šestém vzorku byly porušeny v lepeném spoji. Přetržení vzorků v lepeném spoji mohlo být způsobeno špatnou smáčivostí lepidla nebo špatným poměrem smíchání základní složky a tvrdidla u lepidla. Lze konstatovat, že povlaky vytvořené žárovými nástřiky elektrickým obloukem v různých tloušťkách (viz tab. č. 3) nemají vliv na snížení přilnavosti povlaků a je tedy možné na základní materiál nanášet i vrstvy o tloušťkách 1,5 mm.

14 Závěr

Na 36 vzorcích byly provedeny experimenty týkající se přilnavosti a tribologie povlaků vytvořených žárovými nástřiky.

Hlavním hodnotícím kritériem pro stanovení adhezivní pevnosti vrstev k základnímu materiálu byla zkouška přilnavosti. Testu adhezivní pevnosti bylo podrobena 27 vzorků. Z tohoto měření lze konstatovat, že kromě dvou vzorků (vzorek č. 2, č. 6) u kterých došlo k odtržení povlaku, byly všechny vzorky porušeny v lepeném spoji. Bylo tedy dosaženo vyšších hodnot adhezivní pevnosti povlaků než odpovídající pevnost lepeného spoje.

Z hlediska tribologických vlastností a měření tvrdosti se ukázalo, že v prostředí, kde je strojní součást vystavena dvou i tří tělesovému opotřebením, je vhodnější použít pod funkční vrstvou povlak ARC 502 (vzorek č. 6), u kterého došlo k nejmenšímu opotřebením v obou hodnotících metodách a který dosahoval lepších hodnot tvrdosti než ostatní vzorky. Proto je také vhodnější tento povlak využívat nejen jako podkladovou vrstvu pod funkční, ale i jako samotnou funkční vrstvu i přesto, že metalografie za použití obrazové analýzy vyhodnotila tento vzorek obsahující největší podíl porů jako mírně nevyhovující.

Hodnocením mikrostruktury nebyl u žádného ze vzorků prokázán výskyt trhliny v objemu povlaku ani na rozhraní povlaku a základního materiálu. Lze konstatovat, že i povlaky s největšími tloušťkami vrstev byly velmi dobře ukotveny k základnímu materiálu a vykazovali dobrou homogenitu. Rozdílná pórovitost jednotlivých materiálů neměla vliv na snížení vlastností povlaků.

Z důvodů použití žárových nástřiků jako renovačního prostředku, kde byly zkoušeny různé tloušťky podkladových vrstev, bylo dosaženo přibližně shodných hodnot vlastností, viz např. mikrotvrdość, povrchová tvrdost, adheze. Lze tedy konstatovat vhodnost používání žárových nástřiků vytvořených elektrickým obloukem až do tloušťky 1,5 mm bez projevů změn vlastností. Použitá technologie nanášení žárových povlaků dle hodnot mikrotvrdości příznivě ovlivňuje stav podkladové vrstvy – se vzrůstající tloušťkou vrstvy roste i měřená mikrotvrdość.

Seznam použité literatury

- [1] Renovace a opravy náhradních dílů. [online]. 2005 [cit. 2013-04-22]. Dostupné z: <http://www.rbservis.cz/renovace/7-vse/3-renovace-a-opravy-nahradnich-dilu.html>
- [2] Údržba a renovace. [online]. 2008 [cit. 2013-04-22]. Dostupné z: http://tf.czu.cz/~pexa/Predmety/PUS/Prednasky/7_Udrzba_renovace_RGB.pdf
- [3] Renovace strojních součástí. [online]. 2001 [cit. 2013-04-22]. Dostupné z: http://www.agroweb.cz/Renovace-strojnich-soucasti__s46x9970.html
- [4] *Výroba a aplikované inženýrství ve svařování*. kolektiv autorů, recenzent Oldřich Ambrož. 1. vyd. Ostrava: Česká svářečská společnost ANB, ZEROSS - svářečské nakladatelství, 2000. 213 s. ISBN 80-85771-72-1. S. 194-197.
- [5] HOUDKOVÁ ŠIMŮNKOVÁ, Šárka, ENŽL, Radek, BLÁHOVA, Olga. *Žárové nástřiky: moderní technologie povrchových úprav* [online]. 2003 [cit. 2008-03-16]. Dostupný z WWW: <<http://www.kmm.zcu.cz/CD/index.htm>>.
- [6] Kraus V.: *Povrchy a jejich úpravy*; Plzeň 2000
- [7] SVOBODA, Bohuslav. *Diagnostika a servis strojů se zaměřením na stroje zemědělské*. Dostupné z: http://theses.cz/id/bm8s93/technick_diagnostika.pdf. Bakalářská práce. JCU.
- [8] RACKOVÁ, Š: *Tribologické charakteristiky žárově stříkaných povlaků za vysokých teplot*, [Diplomová práce], Plzeň ZČU, FST, KMM, 2007.
- [9] BURAKOWKI, T., WIERZCHON, T.: *Surface engineering of metals*, New York, CRC Press LLC, 1999, ISBN – O-8493-8225-4.
- [10] HOUDKOVÁ ŠIMŮNKOVÁ, Š., *Nová generace motorů se zvýšeným dopadem na životní prostředí přizpůsobených pro práci s nekonvenčními palivy a mazivy, Průběžná zpráva o realizaci projektu EUREKA E!4204*, č.p. OE 09001, 2009.
- [11] BAYER, R.G., *Mechanical Wear Prediction and Prevention*, Marcel Decker Inc., New York, 1994.
- [12] AMBROŽ, Oldřich, KAŠPAR, Jiří. *Žárové nástřiky a jejich průmyslové využití*. 1. vyd. Praha: SNTL, 1990. 320 s. ISBN 80-03-00347-4.
- [13] Servis armatur. [online]. 2012 [cit. 2013-04-22]. Dostupné z: <http://www.servisarmatur.cz/index.php?page=references>
- [14] PŘEDSTAVENÍ SPOLEČNOSTI PLASMAMETAL: TECHNOLOGIE ŽÁROVÉHO stříkání [online]. 2002, 11. 3. 2002 [cit. 2008-04-04]. Dostupný z WWW: <<http://www.plasmametal.cz/>>.

- [15] KUBÍČEK, Jaroslav. *Renovace a povrchové úpravy*. Brno, 2006. 90 s. Vysoké učení technické v Brně, fakulta strojního inženýrství. Sylabus. Dostupný z WWW: <http://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/opory_soubory/renovace_a_povrchove_upravy__kubicek.pdf>.
- [16] ZIMMERMANN, Stefan. *Cold Gas Spraying : Technology and Materials*. [s.l.]: [s.n.], 2007 tisk. 31 s.
- [17] BiLFINGER. *Bilfinger Industrial Services Czech s.r.o.*. [online]. 26. 5. 2013 [cit. 2013-05-26]. Dostupné z: <http://www.bisczech.cz/produkty-a-sluzby/reseni-pro-energeticky-prumysl/renovace-strojnich-dilu>
- [18] KŘÍŽ, Antonín. Tribologická analýza PIN-on-DISC. In: [online]. Hradec nad Moravicí, 2004 [cit. 2012-06-30]. Dostupné z: http://www.ateam.zcu.cz/TRIBOLOGICKA_ANALYZA_PIN-ON-DISC.pdf
- [19] HÁJEK, Jiří, KŘÍŽ, Antonín. *Tribologická analýza PIN-on-DISC*, Metal 2005, Hradec nad Moravicí 2005
- [20] ČSN EN ISO 6507 Kovové materiály – Zkouška tvrdosti dle Vickerse (5/1999).
- [21] ČSN EN 582, *Žárové stříkání – stanovení přilnavosti v tahu*, Český normalizační institut, Praha, 1995
- [22] R. Enžl, *Vysokoteplotní nástřik povlaku na bázi karbidu wolframu*, Disertační práce, Fakulta aplikovaných věd, ZČU, 1999, s. 49

Seznam obrázků

Obr. 1: Podstata vytváření žárových nástřiků	15
Obr. 2: Schéma struktury žárového nástřiku	16
Obr. 3: Hloubka proniknutí indentoru a oblast ovlivněná vtiskem	18
Obr. 4: Klasifikace tribologických procesů	20
Obr. 5: Typy abrazivního opotřebení	21
Obr. 6: Rozdělení žárových nástřiků	21
Obr. 7: Žárový nástřik plamenem	22
Obr. 8: Schéma žárového nástřiku plamenem – přídavný materiál prášek	23
Obr. 9: Schéma žárového nástřiku plamenem – přídavný materiál drát	24
Obr. 10: Vysokorychlostní nástřik plamenem – HVOF	25
Obr. 11: Schéma principu vysokorychlostního nástřiku plamenem - HVOF	26
Obr. 13: Nástřik elektrickým obloukem	28
Obr. 14: Schéma principu nástřiku elektrickým obloukem	28
Obr. 15: Schéma stříkací pistole pro nástřik studeným plynem	30
Obr. 16: Schéma principu nástřiku studeným plynem	30
Obr. 17: Porovnání procesů žárového nástřiku z hlediska teploty a rychlosti dopadajících částic	32
Obr. 18: Zařízení pro otryskávání	34
Obr. 19: Podélný řez trubičkovým drátem	37
Obr. 20: Zařízení OSU G 30/4	41
Obr. 21: Stříkací pistole LD/U2	41
Obr. 22: Zkušební vzorek č. 8 z oceli ČSN 17 255	44
Obr. 23: Vzorek po otryskání při tlaku 0,7 MPa	45
Obr. 24: Povlak NiCr vytvořený na vzorku	45
Obr. 25: Vzorek po obroušení	45
Obr. 26: Optický mikroskop NIKON OPTIPHOT-100 s digitální kamerou	46
Obr. 27. Mikrostruktura povlaku NiCr v řezu; tloušťka vrstvy 0,4 mm;	47
zvětšení 100x; vzorek č. 1	47
Obr. 28. Mikrostruktura povlaku NiTi v řezu; tloušťka vrstvy 0,4 mm;	48
zvětšení 100x; vzorek č. 2	48
Obr. 29. Mikrostruktura povlaku NiTi + NiCr v řezu; tloušťka vrstvy 0,4 + 0,4 mm;	48
zvětšení 50x; vzorek č. 3	48
Obr. 30. Mikrostruktura povlaku NiTi + NiCr v řezu; tloušťka vrstvy 0,8 + 0,4 mm;	49
zvětšení 50x; vzorek č. 4	49
Obr. 31. Mikrostruktura povlaku NiTi + NiCr v řezu; tloušťka vrstvy 1,1 + 0,4 mm;	49

zvětšení 100x; vzorek č. 5.....	49
Obr. 32. Mikrostruktura povlaku ARC 502 v řezu; tloušťka vrstvy 0,4 mm;	50
zvětšení 100x; vzorek č. 6.....	50
Obr. 33. Mikrostruktura povlaku ARC 502 + NiCr v řezu; tloušťka vrstvy 0,4 + 0,4 mm;	50
zvětšení 50x; vzorek č. 7.....	50
Obr. 34. Mikrostruktura povlaku ARC 502 + NiCr v řezu; tloušťka vrstvy 0,8 + 0,4 mm;	51
zvětšení 50x; vzorek č. 8.....	51
Obr. 35. Mikrostruktura povlaku ARC 502 + NiCr v řezu; tloušťka vrstvy 1,1 + 0,4 mm;	51
zvětšení 50x; vzorek č. 9.....	51
Obr. 36: Hodnocení pórovitosti pomocí softwaru LUCIA.....	52
Obr. 37: Metoda Dry Sand/Rubber Wheel test	54
Obr. 38: Tvrdoměr typu Vickers	59
Obr. 39: Vtisk provedený metodou podle Vickerse	61
Obr. 40: Stanovení přilnavosti v tahu	63
Obr. 41: Universální stroj pro statickou zkoušku tahem	64
Obr. 42: Porušení povlaku NiTi (vzorek č. 2) na rozhraní mezi nastříkaným povlakem a podkladovým materiálem.....	66

Seznam tabulek

Tab. 1: Porovnání jednotlivých metod žárových nástřiků.....	32
Tab. 2: Rozsah nastavitelných parametrů na zařízení OSU G 30/4	42
Tab. 3: Přehled vytvořených vrstev a jejich tloušťek.....	44
Tab. 4: Vyhodnocení pórovitosti vrstev.....	53
Tab. 5: Parametry při zkoušce opotřebení metodou Dry Sand/Rubber Wheel test	54
Tab. 6: Parametry při zkoušce opotřebení metodou PIN-on-DISK	58
Tab. 7: Tabulka naměřených hodnot tvrdosti povlaků – měření na povrchu.....	60
Tab. 8: Hodnoty mikrotvrdosti HV0,3 a jejich směrodatné odchylky.....	62
Tab. 9: Hodnoty maximálního zatížení a meze pevnosti v tahu na jednotlivých vzorcích.....	65

Seznam grafů

Graf 1: Snížení přilnavosti povlaků v důsledku oxidace povrchu podložky	35
Graf 2: Opotřebení povlaku NiCr.....	55
Graf 3: Opotřebení povlaku NiTi	56
Graf 4: Opotřebení povlaku ARC 502.....	56
Graf 5: Celkový přehled opotřebení povlaků	57
Graf 6: Opotřebení povlaku po tribologické zkoušce PIN-on-DISK.....	58
Graf 7: Tvrdost povrchových vrstev na jednotlivých vzorcích.....	60
Graf 8: Hodnoty tvrdostí v závislosti na různých tloušťkách povlaků.....	62
Graf 9: Nárůst a pokles hodnot tvrdostí v závislosti na různých tloušťkách povlaků.....	71