



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

**Fakulta strojní
Ústav materiálového inženýrství**

**Perspektivní materiály pro technologii HVOF s aplikací v dopravní
technice**

**Perspective Materials for the HVOF – technology and their
Application in Transport Engineering**

Bakalářská práce

Studijní program: Výroba a ekonomika ve strojírenství
Studijní obor: Technologie, materiály a ekonomika ve strojírenství

Vedoucí práce: prof. Dr. Ing. Libor Beneš, IWE

Martin Nosek

Praha 2016



ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

pro:	Martina NOSKA
program:	Výroba a ekonomika ve strojírenství
obor:	Technologie, materiály a ekonomika strojírenství
název česky:	Perspektivní materiály pro technologii HVOF s aplikací v dopravní technice
název anglicky:	Perspective Materials for the HVOF-technology and their Application in Transport Engineering

Zásady pro vypracování:

Cíl: Posouzení vrstev, navařených technologií HVOF - žárový nástřik, se zřetelem na výslednou strukturu návarového spoje, jeho kompaktnost a materiálové vlastnosti, s aplikací pro vybranou součást z oblasti dopravní techniky. Zmapování současného stavu a predikce dalšího vývoje v této oblasti.

Postup:

1. Provedení literární rešerše současného stavu řešené problematiky.
2. Žárové nástřiky, materiálové aspekty, možnosti aplikací.
3. Stávající a perspektivní přídavné materiály pro technologii žárových nástřiků.
4. Experimentální část - posouzení vybraného návarového spoje.
5. Závěr, shrnutí, doporučení.

Rozsah průvodní zprávy: 30 – 40 stran

Rozsah grafických prací: dle potřeby

SEZNAM DOPORUČENÉ LITERATURY:

[1] *Žárové nástřiky*. Katedra materiálu a strojírenské metalurgie [online]. 2003 [cit.2014-05-20]. Dostupné z: http://www.kmm.zcu.cz/CD/content/8_4.html.

[2] Mazancová, E. *Technické materiály I*. [Dokument pdf] Ostrava : Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, 2012. ISBN 978-80-248-2577-9.

[3] Filipenský, J. *Aplikace technologie žárového nástřiku v oblasti oprav a renovací, možnosti uplatnění ve sklářství*. CD-ROM firmy WIRPO s.r.o., verze 1.02, 2003

[4] Machek, V. a Sodomka, J. *Speciální kovové materiály*. Praha: Česká technika-nakladatelství ČVUT, 2008. ISBN 978-80-01-04212-0.

Vedoucí bakalářské práce: prof. Dr. Ing. Libor Beneš, IWE

Konzultant bakalářské práce: Ing. Tomáš Koudelka; DTD Brno, s.r.o.

Datum zadání bakalářské práce: 25. dubna 2016

Datum odevzdání bakalářské práce: 19. srpna 2016

Neodevzdá-li student bakalářskou práci v určeném termínu, tuto skutečnost předem písemně zdůvodnil a omluva byla děkanem uznána, stanoví děkan studentovi náhradní termín odevzdání bakalářské práce. Pokud se však student řádně neomluvil nebo omluva nebyla děkanem uznána, může si student zapsat bakalářskou práci podruhé.

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

Zadání bakalářské práce převzal dne: 25-04-2016

.....
student

.....
Prof. RNDr. Petr Špatenka, CSc.
vedoucí ústavu



.....
Prof. Ing. Michael VALÁŠEK, DrSc.
děkan fakulty

V Praze dne 20. dubna 2016

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem zadanou bakalářskou práci zpracoval sám a použil jsem podklady uvedené v příloženém seznamu.

Nemám závažný důvod proti užívání tohoto školního díla ve smyslu §60 Zákona č. 121/2000 Sb. o právu autorském, právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Praze dne 18. 8. 2016

.....

Poděkování

Tímto děkuji vedoucímu bakalářské práce prof. Dr. Ing. Libor Beneš, IWE za odborné vedení, ochotu a čas strávený konzultacemi této práce. Dále bych chtěl poděkovat Ing. Tomášovi Koudelkovi a dalším zaměstnancům ze společnosti DTD Brno za poskytnutí praktických rad.

ABSTRAKT

Práce se zabývá současnými postupy nanášení žárových nástřiků a jejich použití na strojní součásti, které jsou využívány především pro dopravní techniku. Analyzuje druhy a typy přídavných materiálů, jejich základní vlastnosti, přičemž se soustředí zejména na nanášení metodou HVOF. V praktické části zkoumá postup při renovaci kloubového spojení za pomoci využití žárového nástřiku.

Klíčová slova

žárové nástřiky, přídavné materiály, HVOF, renovace, dopravní technika

ABSTRACT

This bachelor's thesis describe the current procedures of application of thermal spray technology and their use on machine parts that are used primarily for transport technology. It analyzes the types and kinds of materials, their properties, focusing in particular on the application by the HVOF spray technology. Thesis in the practical part examines the renovating process of the connecting part of the trolley bus through the use of thermal spray process.

Key words

thermal spray technology, materials, HVOF, renovation, transport engineering

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta strojní

Ústav materiálového inženýrství

1. ÚVOD	1
2. ŽÁROVÉ NÁSTŘIKY	2
2.1. Historie	2
2.2. Princip vytváření žárového nástřiku.....	2
2.3. Základní parametry procesu	4
2.4. Struktura žárových nástřiku	4
3. ROZDĚLENÍ A TECHNOLOGIE ŽÁROVÝCH NÁSTŘIKŮ	5
3.1. Žárový nástřik elektrickým obloukem	5
3.2. Žárový nástřik plazmou	6
3.3. Nástřik plamenem	8
3.4. Detonační nástřik.....	9
3.5. Vysokorychlostní nástřik plamenem HVOF	10
3.6. Nástřik studeným plynem	12
4. PŘÍDAVNÉ MATERIÁLY	13
4.1. Přídavné materiály z hlediska formy	13
4.1.1. Přídavné materiály ve formě prášku	14
4.1.2. Přídavné materiály ve formě drátu	15
4.2. Přídavné materiály z hlediska chemického složení	16
4.2.1. Kovové přídavné materiály.....	16
4.2.2. Keramické přídavné materiály.....	17
4.2.3. Přídavné materiály na bázi plastů	17
4.2.4. Speciální přídavné materiály	18
5. VLASTNOSTI POVLAKŮ A JEJICH ZKOUŠENÍ	18
5.1. Vzhled povlaků	18
5.2. Tvrdost povlaků	19
5.3. Tloušťka povlaků	19

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta strojní

Ústav materiálového inženýrství

5.4. Měření pórovitosti povlaků.....	20
5.5. Drsnost povrchu povlaků	21
5.6. Přilnavost povlaků k podložce	22
5.7. Odolnost proti opotřebení	23
6. VLASTNOSTI POVLAKŮ APLIKOVANÝCH JAKO TBC.....	24
6.1. Odolnost povlaků proti korozi za vysokých teplot	24
6.2. Odolnost povlaků proti žáru.....	25
7. MATERIÁLY A JEJICH APLIKACE METODOU HVOF PRO DOPRAVNÍ TECHNIKU	25
7.1. Aplikace v automobilovém průmyslu.....	25
7.1.1. Materiály vhodné pro HVOF nástřik pístních kroužků	26
7.1.2. Materiály vhodné pro HVOF nástřik stěn válců spalovacího motoru	27
7.1.3. Materiály vhodné pro HVOF nástřik výfukové soustavy spalovacího motoru	27
7.1.4. Materiály vhodné pro HVOF nástřik částí převodového ústrojí.....	28
7.1.5. Materiály vhodné pro HVOF nástřik brzdových kotoučů	28
7.2. Ostatní aplikace materiálů metodou HVOF na součásti pro dopravní techniku.....	28
8. PRAKTICKÁ ČÁST.....	29
8.1. Představení společnosti DTD Future Brno s.r.o., ve které se renovace kloubového spojení realizuje	29
8.2. Využití žárového nástřiku na renovaci kloubového spojení trolejbusu	29
8.3. Vznik opotřebení	31
8.4. Použité materiály na renovaci kloubového spojení	31
8.5. Postup renovace kloubového spojení	31
8.6. Výstupní kontrola	32
8.7. Metodika hodnocení mikrostruktury povlaku	33
8.8. Vyhodnocení mikrostruktury povlaku.....	34
9. ZÁVĚR	35
10. ZDROJE	36

1. Úvod

Vytváření povlaků pomocí technologií žárových nástřiků bylo vynalezeno na konci 19. století, kdy byla použita metoda známá jako metalizace, která je dodnes používána. Zjevné výhody, které tento způsob aplikace různorodých materiálů na různé podklady má, vedly k růstu poptávky po vývoji nových a zdokonalování již známých používaných metod žárového stříkání.

Rozvoj průmyslu, který nastal v důsledku druhé světové války a pokračoval nadále i po jejím skončení, významně urychlil už tak velkou poptávku po způsobu jak renovovat strojní součásti, díly pro dopravní a zemědělskou techniku a součásti, které se využívají v energetice, v chemickém a petrochemickém průmyslu. S rostoucím rozsahem využívání žárového stříkání v oblastech pro renovace strojních součástí, se nově objevila otázka, zda by nebylo možné využít jejich výhod i v prvovýrobě, ke zvýšení odolnosti proti opotřebení, korozi, proti vysokým teplotám apod. a dále k nanášení materiálů, které jsou buď drahé, nebo jejich fyzikální vlastnosti jsou k užítku na vybraných strojních součástech pouze ve formě tenké vrstvy povlaku. Tím došlo k rozvoji přídavných materiálů na bázi oxidických a neoxidických keramik, cermetů, superslitin nebo k vrstvení povlaků na tzv. tepelné bariéry. Pro některé přídavné materiály byly upraveny nebo vyvinuty nové technologie nanášení. Například nástřik keramik plasmou nebo zdokonalení procesu nástřiku plamenem až k HVOF.

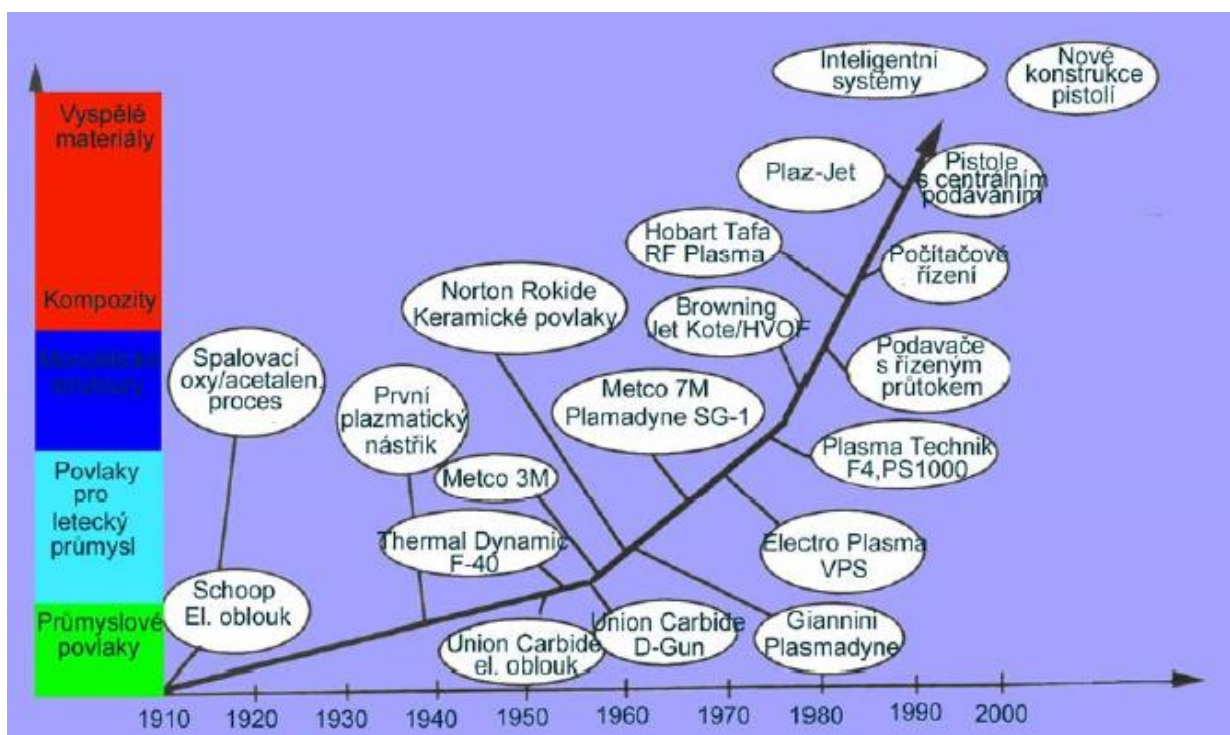
Novým trendem v nanášení materiálů je nástřik studeným plynem, kde se nenatavuje přídavný materiál, ale pouze se částice urychlí na nadzvukovou rychlost, čímž například nedojde k oxidaci částic nanášeného materiálu vlivem tepla.

Cílem této práce je analyzovat současné postupy nanášení žárových nástřiků. Uvést principy jednotlivých zařízení a jejich základní technologické parametry. Popsat typy a druhy přídavných materiálů obecně a pro metodu HVOF, jejich základní vlastnosti s odkazem na jejich aplikace na strojní součásti využívané v různorodé dopravní technice, zejména ale v automobilovém průmyslu. V praktické části je zkoumáno užití žárového nástřiku při renovaci opotřebeného spojovacího kloubu trolejbusu, kterou provádí společnost DTD Future Brno. Je vyhodnoceno, zda je materiál pro nástřik vhodný ke splnění účelu renovace, a také je analyzován metalografický výbrus a to s ohledem na zakotvení povlaku na podložce. Na základě zjištěných údajů byl proveden odhad pórovitosti nanášeného povlaku z materiálu NiTi.

2. Žárové nástřiky

2.1. Historie

Prvotní použití žárových nástřiků se datuje na konec 19. století kdy si nechal M. U. Schoop patentovat metodu dnes zvanou jako šopování nebo metalizace. Patent popisuje způsob žárového nanášení Pb a Cu pomocí modifikovaného svařovacího hořáku na acetylen. Později byly hořáky modifikovány tak aby bylo možné do spalovací komory dodávat přídavný materiál ve formě prášku. Významný posun ve vývoji a praktickém využívání žárových nástřiků nastal s vynalezením plazmatického nástřiku ve 40. letech 20. století a dále v 50. letech, kdy byla vynalezena a do praktického používání zavedena metoda zvaná detonační nástřik. V roce 1958 ve společnosti Union Carbide probíhaly zkoušky nové metody, dnes zvané jako HVOF (High-Velocity Oxyfuel Spray). K praktickému využití HVOF došlo kolem roku 1980 kdy společnost JetKote pomocí této metody začala renovovat součásti pro turbínové letecké motory.[1][2]



Obr. 1 - Vývoj technologií, materiálů a zařízení pro žárové nástřiky. Vlastní úprava. Zdroje dat [1][2]

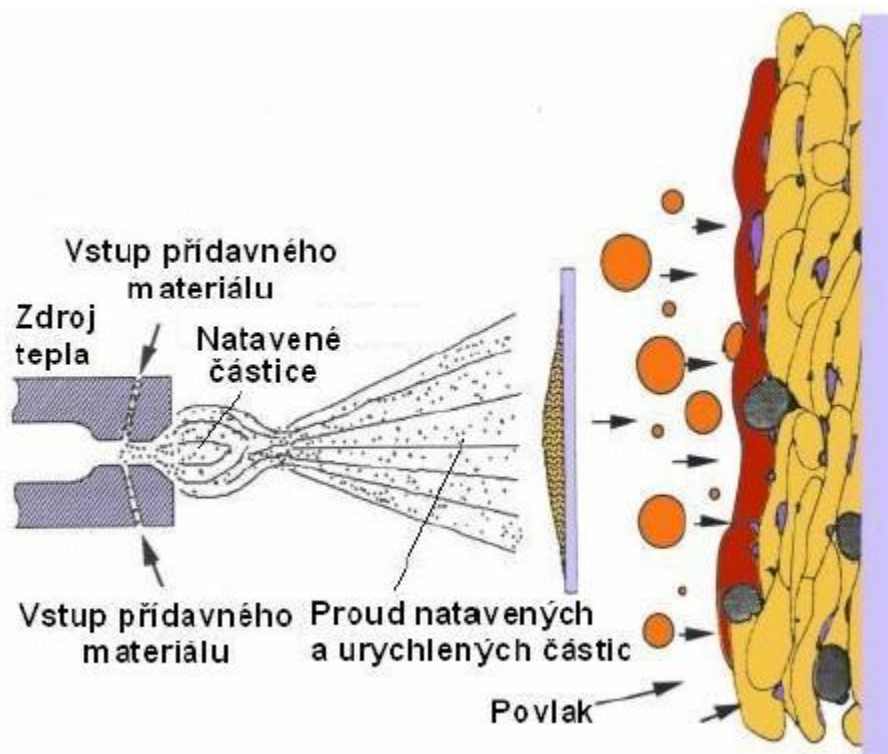
2.2. Princip vytváření žárového nástřiku

Podstatou všech technologických postupů žárového nástřiku využívaných při vytváření povlaků je dopad částic nataveného přídavného materiálu, přiváděného ve formě prášku, drátu nebo dutých trubiček na upravený povrch podložky, kde dojde k jejich

rozprostření a rychlému tuhnutí. Celý průběh žárového nástřiku a vytvoření povlaku můžeme rozdělit na několik po sobě následujících fází:

- 1) fáze vstupu nanášeného materiálu do zdroje energie;
- 2) fáze formování částic nanášeného nataveného materiálu;
- 3) fáze letu nanášených částic od jejich vzniku, do okamžiku jejich dopadu na povlakovaný povrch;
- 4) fáze ochlazování povlaku na povlakovaném povrchu.

Každá fáze nanášení povlaku významně ovlivňuje kvalitu, strukturu a mechanické vlastnosti naneseného povlaku. Zdrojem tepelné energie může být elektrická energie nebo spalovací proces. Podle druhu zdroje a konstrukce zařízení rozlišujeme nástřik plamenem, nástřik plazmou, nástřik elektrickým obloukem, vysokorychlostní nástřik a nástřik studeným plynem. Od ostatních technologií nanášení povlaků se žárový nástřik liší tím, že není založen na principu nanášení jednotlivých atomů a iontů. Na povrch dopadají celé natavené nebo částečně natavené částice z nanášeného materiálu, které ulpívají pouze na povrchu těles v dráze pohybujících se natavených částic. Schematicky znázorněno na Obr. 2. Technologie žárových nástřiků umožňuje nanášet různé povlaky z těch materiálů, u kterých nedochází k rozpadu pod bodem tání, na prakticky všechny druhy základních materiálů. To je umožněno zejména mechanickým zakotvením na zdrsňeném povrchu povlakovaného materiálu.[2]



Obr. 2 – Princip vytváření žárového povlaku [3]

2.3. Základní parametry procesu

Při vytváření žárového nástřiku dochází k natavení částic přídavného materiálu zdrojem tepla, které je využito buď zcela, nebo částečně a také je využíváno pro unášení natavených částic směrem k povlakovanému povrchu. Nejdůležitější sledované parametry procesu vytváření žárového nástřiku je teplota a rychlost částic. Oba parametry jsou ovlivněny technologickými možnostmi zvolené metody žárového nástřiku a v menší míře druhem přídavného materiálu.[1][3]

Technologie	Forma materiálu	Teplota zdroje [C°]	Rychlost částic [m.s ⁻¹]	Nejčastěji využívané materiály	Vlastnosti povlaku	Vhodné aplikace
Nástřik el. obloukem	drát	4000 - 8000	50 - 300	kovy, slitiny, cermety	větší tloušťka, vysoká hustota	renovace, otěruvzdorné povlaky
Plazmatický nástřik	prášek	12 000 - 20 000	100 - 800	keramika	porézní v případě keramik	izolátory, tepelné bariéry
Nástřik plamenem	prášek/drát	2700 - 3050	80 - 100	kovy, slitiny, plasty	vyšší obsah oxidů a vyšší porézita	méně náročné aplikace
Detonační nástřik	prášek	4000 - 6000	1000<	kovy, slitiny, cermety	vysoká tvrdost, nízká porózita a obsah oxidů	ochrana proti opotřebení
HVOF	prášek	2800 - 3200	200 - 1200	kovy, slitiny, cermety	velká hustota, výborná adheze, tlakové pnutí	ochrana proti korozi, opotřebení
Nástřik studeným plynem	prášek	<900	500 - 1500	měkké kovy a jejich slitiny	větší tloušťka, nízký obsah oxidů	vodivé povlaky, ochrana proti korozi

Tab. 1 – Charakteristiky žárových nástřiků [3]

2.4. Struktura žárových nástřiků

Při užití metod žárového nástřiku, jenž využívají k natavení částic teplo, se povlak skládá z jednotlivých deformovaných částic, nenatavených částic, částečně natavených a natavených částic, oxidických částic a póru. Při využití technologie zhotovení povlaku

pomocí nástřiku studeným plynem (The Cold Spray Proces), je struktura tvořená obvykle pouze deformovanými a částečně deformovanými částicemi.

U obou variant, se tvoří lamelární struktura povlaku. V ideálním případě se dopadající částice rozprostře ve tvaru disku. U nástřiků studeným plynem se tento jev děje pouze díky velkému urychlení částic přídavného materiálu směrem k podložce. Pro ostatní technologie žárového stříkání se využívá kombinace tepla k natavení a urychlení částic, které se nejčastěji děje pomocí nosného plynu.[3]

3. Rozdělení a technologie žárových nástřiků

Žárové nástřiky zhotovené pomocí el. oblouku:

- nástřik elektrickým obloukem;
- nástřik plazmatickým nástřikem.

Žárové nástřiky zhotovené pomocí spalování plynů:

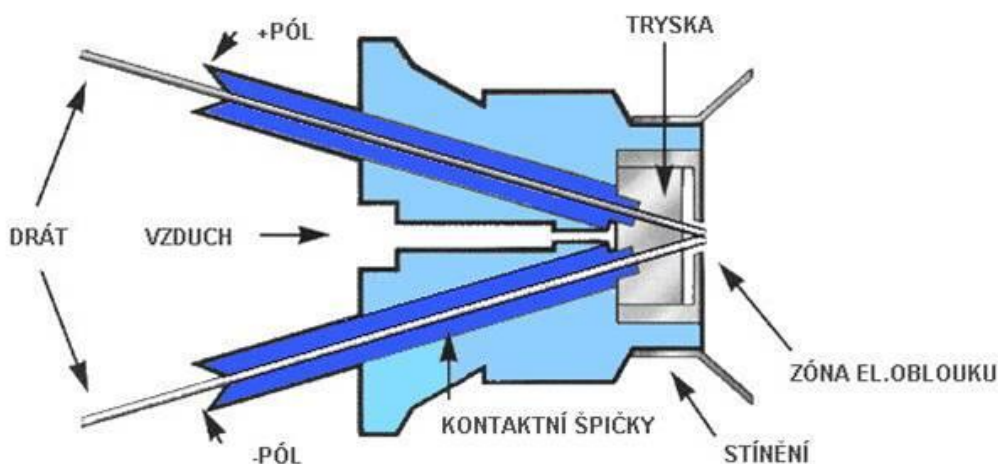
- nástřik plamenem;
- detonační nástřik;
- HVOF (High-Velocity Oxyfuel Spray).

Metoda bez natavení částic:

- Nástřik studeným plynem (The Cold Spray Process).

3.1. Žárový nástřik elektrickým obloukem

Principiálně jeho původ sahá k patentu M.U. Schoopa z přelomu 19. a 20. století, ale k praktickému použití došlo až v 60. letech 20. století. Technologie této metody je založena na tavení vodivých materiálů teplem elektrického oblouku, který hoří mezi dvěma vodivými přídavnými materiály. Pro pohyb roztavených částic směrem k povlakovanému povrchu se používá stlačený, čistý a suchý vzduch o tlaku 0,35 až 0,7 MPa.[2]



Obr. 3 - Schéma trysky pro nástřik elektrickým obloukem [4]

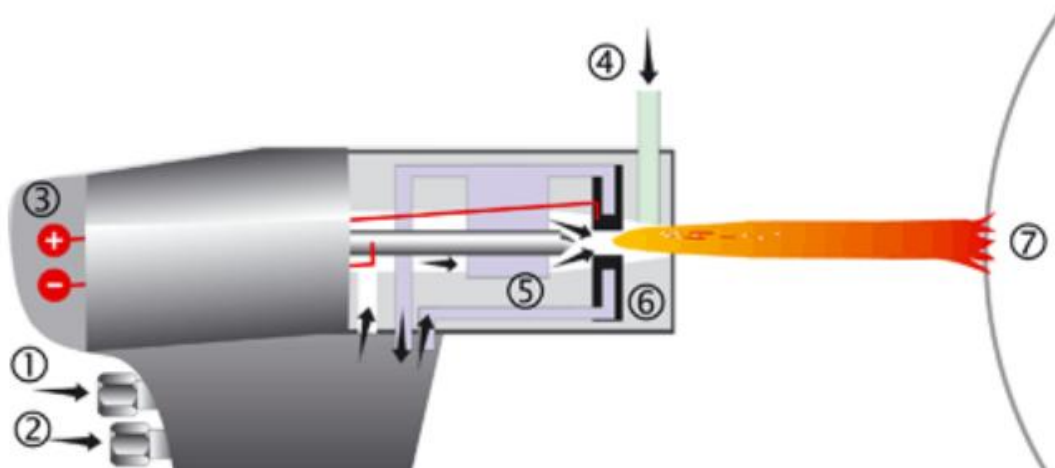
Technologické zařízení je poměrně jednoduché a nevyžaduje vytváření žádných specializovaných pracovišť. Nejčastěji se aplikuje jako mobilní zařízení. Metodu nanášení žárového nástřiku elektrickým obloukem limituje nutnost použití elektricky vodivých přídavných materiálů. Z hlediska bezpečnosti práce je tato metoda doprovázena intenzivním infračerveným, ultrafialovým a viditelným zářením a nadměrným hlukem.

Parametry nanášené vrstvy ovlivňujeme:

- velikostí proudu;
- velikostí napětí;
- tlakem vzduchu;
- vzdáleností konce hubice od povlakované součásti;
- množstvím nanášeného přídavného materiálu.[2]

3.2. Žárový nástřik plazmou

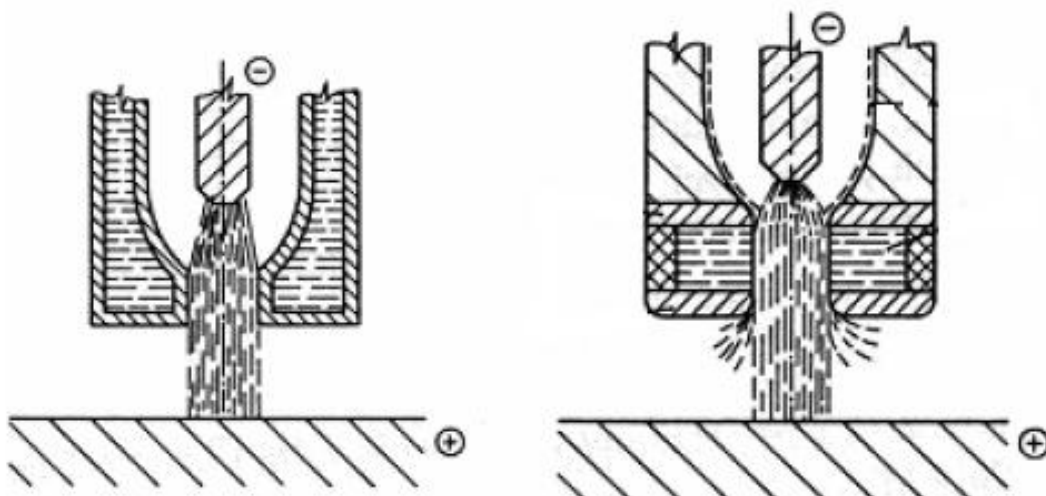
Technologie plazmového stříkání je zdokonaleným vývojovým stupněm metalizace. Použití plazmového oblouku jako zdroje tepla bylo dáno požadavkem na vyšší kvalitu nanášených povlaků a také požadavkem na efektivní způsob nanášení keramických povlaků.



Obr. 4 – Schéma plazmového hořáku. 1,2 - přívod provozních plynů, 3 – přívod zdroje elektrického proudu, 4 – přívod prášku, 5 – chladicí okruh, 6 – měděná anoda, 7 – povlakovaná součást. [5]

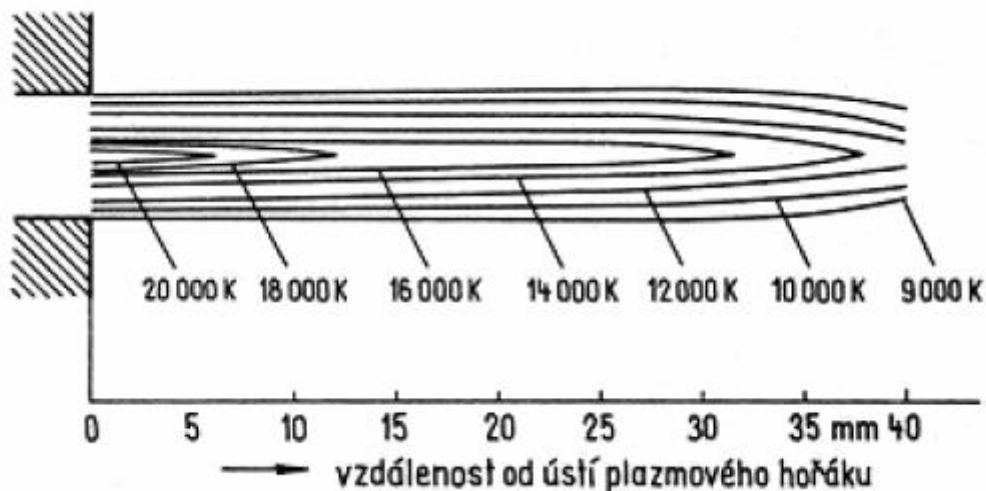
Při použití technologie plazmatického nástřiku hoří elektrický oblouk mezi vodou chlazenou wolframovou katodou a měděnou anodou, která je zároveň tryskou o kruhovém průřezu. Elektrický oblouk hoří obvykle v plynech jako Ar, He, H₂, N₂, v menší míře i ve vzduchu nebo ve vodě (v hořácích s vodní stabilizací).

Konstrukce zařízení pro nástřik pomocí plazmatického paprsku se vzájemně liší tvarem elektrody a způsobem chlazení. Různé konstrukce plazmových hořáků nám umožňují dosahovat různého průtoku plynů a vnesené energie, tak i používat různé druhy přídavných materiálů. V praxi používáme dva druhy plazmových hořáků, viz Obr. 5. Hořák vlevo je vybaven plynou stabilizací a hořák vpravo je vybaven vodní (kapalinou) stabilizací.



Obr. 5 – Schéma hořáku s plynovou (vlevo) a kapalinovou stabilizací (vpravo) [6]

Plazmatický nástřik je charakterizován vysokou koncentrací energie a vysokou teplotou plazmového paprsku. Rozložení teplot v paprsku je zobrazeno na Obr. 6. Teploty v paprsku se mění dle požadovaného nosného stabilizačního plynu. Teplota plazmového paprsku může dosahovat až 20 000 °C i více.



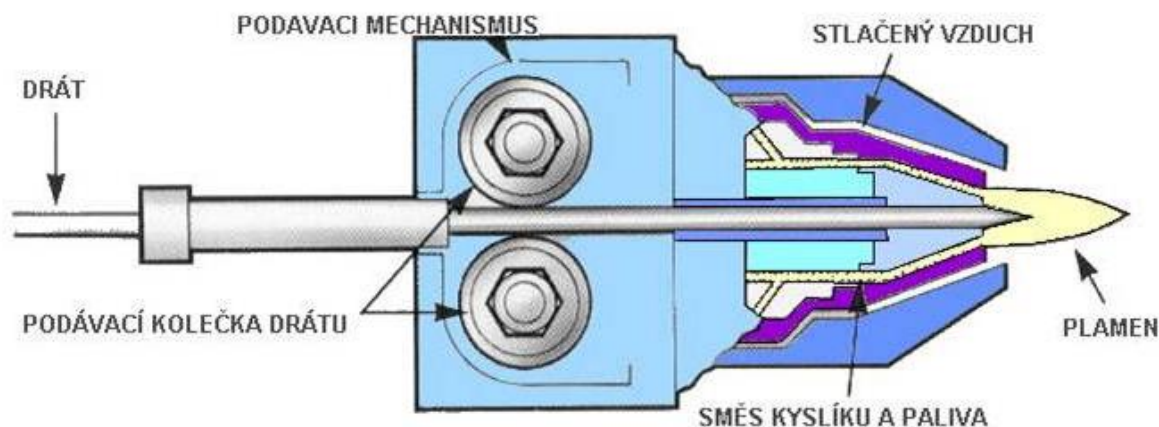
Obr. 6 – Teploty v plazmovém paprsku (plazmový plyn Ar + H₂) [6]

Hustota nanášeného povlaku se pohybuje kolem 89% až 98%. Z důvodů větší složitosti zařízení i celého technologického procesu nanášení povlaku je zde i větší počet technologických parametrů, které můžeme ovlivňovat:

- vzdálenost nástřiku;
- množství nanášeného přídavného materiálu;
- množství plazmového plynu;
- množství dopravního plynu;
- velikost napětí a plazmového proudu.[5][6]

3.3. Nástřik plamenem

Nástřik plamenem patří mezi nejstarší metody vytváření povlaku a stále je hojně využívána. Nástřik plamenem využívá jako zdroj tepla chemické reakce hoření nosného plynu k natavení a částečně i k unášení natavených částic směrem k povlakovanému povrchu. Jako zdroj se nejčastěji používá kyslíkoacetylenového plamene. Na Obr. 7 je znázorněno schéma principu nástřiku plamenem. Výstupní rychlost plamene a jeho energie není taková, aby plně dostačovala k požadované kvalitě a vlastností nanášených povlaků (zejména hustota a přilnavost), proto používáme pro urychlování natavených částic přídavného materiálu suchého a stlačeného vzduchu, nejčastěji pod tlakem 0,6 MPa.[1]



Obr. 7 – Schéma principu žárového nástřiku plamenem [4]

Pro žárový nástřik plamenem se aplikují přídavné materiály ve formě prášku nebo častěji ve formě drátu. Pro materiály na bázi keramiky se využívají tyčinky nebo plněné ohebné trubičky z plastu. Nejčastější průměry drátů jsou 2 mm, 2,5 mm a 3,5 mm. Vzhledem k dosažené maximální teplotě plamene kolem 3000 °C, nelze využít tuto metodu pro materiály, které k natavení vyžadují větší teplotu. Hraniční nanášený materiál z pohledu teploty je molybden (teplota tavení 2 615 °C).

Metoda žárového nástřiku pomocí plamene je velmi rozšířená a jednoduchá. Z ekonomického hlediska patří mezi technologie nejlevnější jak z pohledu ceny pořízení zařízení tak i provozních nákladů. Vlastnosti povlaků nanášených pomocí nástřiku plamenem lze ovlivňovat následujícími technologickými parametry:

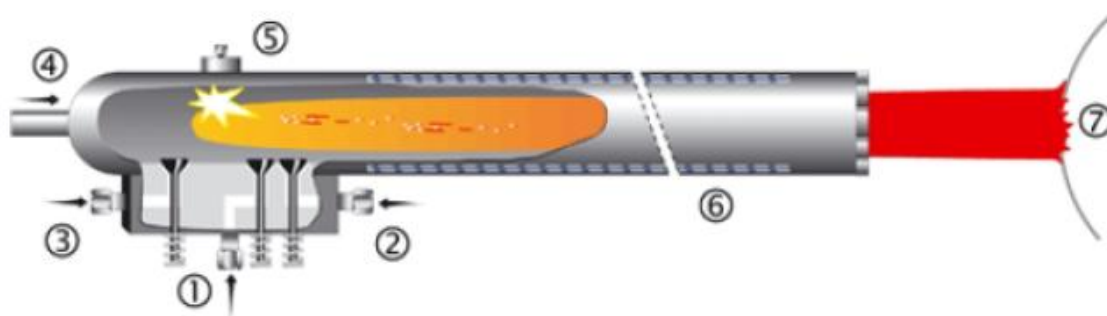
- množství hořlavého plynu;
- množství kyslíku;
- tlakem unášecího vzduchu;
- vzdáleností hubice od povlakovaného povrchu;
- množstvím, tvarem a velikostí přídavných materiálů.[1][2]

3.4. Detonační nástřik

Konvenční nástřik plamenem je svojí konstrukcí a principem unášení natavených částic stlačeným suchým vzduchem omezený v kvalitě nanášeného povlaku, zejména porosity, která bývá často větší než 2%. Tuto nevýhodnou vlastnost odstraňuje způsob nanášení povlaku pomocí detonační vlny. Technologie nástřiku povlaku pomocí detonační vlny byla nejdříve opomíjena z důvodu velkého hluku a rozměrného potřebného zařízení. Ale

v 70. letech 20. století, však došlo ke zvýšení nároků na kvalitu nanášeného povlaku, zejména jeho hustoty, čímž se tato metoda dostala do popředí.[1]

Schematicky je princip metody znázorněn na Obr. 8. Do spalovací komory hořáku pro detonační nástřik je v daném poměru přivedena směs hořlavých plynů a přídavný materiál ve formě prášku. Následně je tato směs stlačena a pomocí zapalovací svíčky zažehnuta. Vzniklá exploze plynů ohřeje a také urychlí částice prášku hrdlem hořáku směrem k povlakované součásti. Jako pracovního média se nejčastěji využívá směsi kyslíku a hořlavého plynu, zejména acetylenu. Pro dopravu přídavných materiálů a čištění spalovací komory se používá dusík. Zařízení nejčastěji pracují s kadencí 5 až 8 výstřelů za sekundu.



Obr. 8 – Schéma detonačního nástřiku. 1 – přívod acetylenu, 2 – přívod kyslíku, 3 – přívod dusíku, 4 – přívod přídavného materiálu, 5 – zapalovací svíčka, 6 – hlaveň, 7 – povlakovaný materiál. [5]

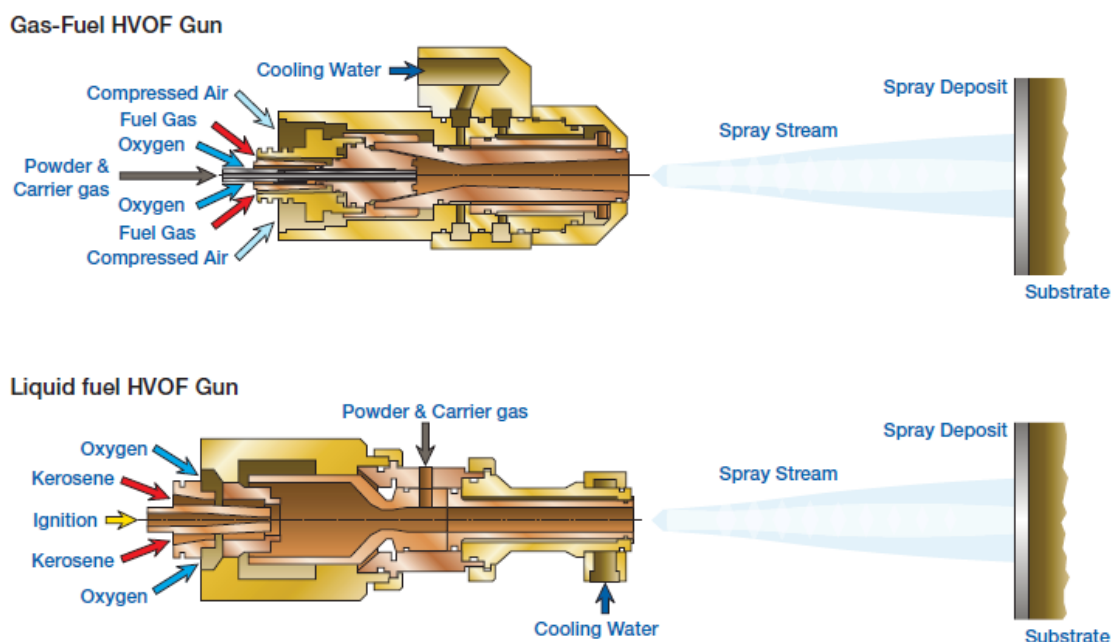
Touto technologií žárového nástřiku lze nanášet téměř všechny typy přídavných materiálů vhodné práškové formy a velikosti částic. Využívá se zejména pro ty povlaky kde základní materiál má vysokou teplotu tavení, materiály speciální a především pro ty, které nejdou nanášet jinou metodou žárového nástřiku. Technologické parametry, které mají vliv a lze je ovlivnit jsou:

- granulometrické složení práškového přídavného materiálu;
- obsah kyslíku v hořlavé směsi;
- vzdálenost nástřiku;
- hloubka plnění směsi.[2][3]

3.5. Vysokorychlostní nástřik plamenem HVOF

Proces vytváření povlaku pomocí metody HVOF byl vynalezen v roce 1958 ve společnosti Union Carbide, ale k jeho komerčnímu využití došlo až kolem roku 1980, kdy firma JetKote představila své modifikované zařízení a speciální hořákové pistole. Metoda HVOF je v určitých pohledech podobná technologii detonačního nástřiku. Rozdíl mezi HVOF a detonačním nástřikem je, že u HVOF probíhá spalování kontinuálně. Schematicky jsou obě

varianty hořáků pro metodu HVOF zobrazeny na Obr. 9. V principu je dané množství hořlavého plynu nebo směsi plynů přiváděno do spalovací komory, nejčastěji používaná směs plynů je methyl-acetylen-propadien (C_3H_4) nebo kerosin či plyn prodáváný pod obchodním názvem Jet-A. Tvar konvergentně divergentní trysky, která bývá nejčastěji 8 až 30 cm dlouhá a chlazená vodou v menším případě vzduchem, urychluje přiváděné produkty hoření až k nadzvukovým rychlostem. Do supersonického plamene se pomocí nosného plynu, nejčastěji N_2 , Ar nebo H_2 , přivede v práškové formě přídavný materiál. Při průchodu tryskou dojde k natavení a urychlení částic směrem k povlakovanému povrchu.[1]



Obr. 9 – Schéma provedení hořáků pro metodu HVOF [5]

Vzhledem k tomu, že zařízení umožňuje širokou regulaci plynů, nedochází v průběhu žárového nástřiku k ohřevu povlakovaného povrchu na teplotu vyšší než $140\text{ }^{\circ}\text{C}$. Povlaky nanesené technologií HVOF se vyznačují nízkou porózitou pod 2% (některé povlaky se vyznačují porózitou až pod 0,5%) a velikostí póru pod $9\text{ }\mu\text{m}$.

Vysoká rychlost částic nataveného prášku při dopadu způsobí jejich téměř ideální rozprostření a uchycení na povlakovaném povrchu. Relativně nízká teplota plamene omezuje použití této technologie pro nanášení keramických povlaků, kde nedojde k natavení prášku během průchodu tryskou a tím pádem nedojde ke kvalitnímu rozprostření a uchycení na povlakované součásti. Nízká pracovní teplota na druhou stranu zabraňuje fázovým přeměnám, oxidaci a vyhořívání některých prvků z nanášeného povlaku. Výhodnou vlastností této

metody je, že při vhodném nastavení depozičních parametrů lze vytvářeny povlaky velkých tloušťek.

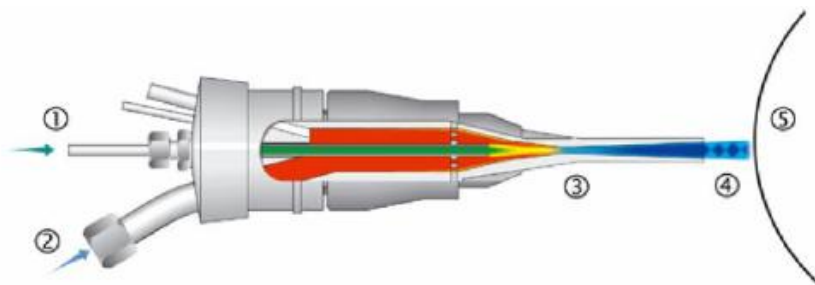
Teplota plamene určuje metodu HVOF pro nástřik kovů a slitin s nízkou a střední hodnotou tavení. Často využívané materiály pro HVOF nástřik jsou cermety nebo materiály na bázi karbidů chromu, wolframu a titanu. Typickou aplikací jsou povlaky odolné proti mechanickému opotřebení a korozi. Technologické parametry, které mají výrazný vliv a lze je ovlivnit jsou:

- vzdálenost nástřiku;
- množství přiváděného nosného plynu;
- množství řídicího plynu plamene;
- granulometrické složení práškového přídavného materiálu.[1][2][5]

3.6. Nástřik studeným plynem

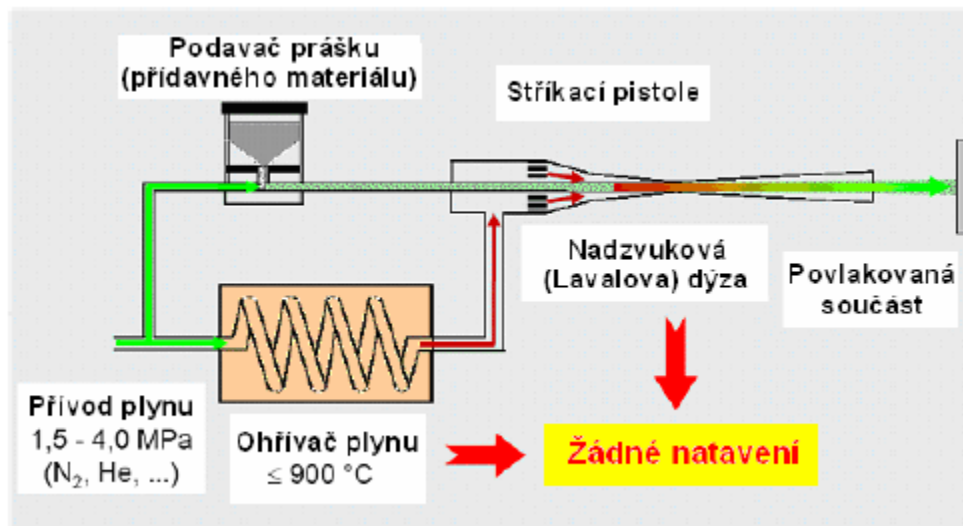
Technologie zhotovení povlaku pomocí nástřiku studeným plynem (TCSP, CSP, The Cold Spray Process) je metoda, která byla poprvé popsána a patentována na počátku 80. let 20. století A.Paparinem, členem Institutu teoretické a aplikované mechaniky Ruské akademie věd v Novosibirsku. Metoda CSP je z větší části pouze ve stádiu vývoje a její praktické aplikace jsou zastoupeny v minimální míře.

Principem této unikátní metody je, že částice přídavného materiálu nejsou vlivem nízké teploty aplikačního plynu, do 900 °C natavovány. Částice přídavného materiálu ve formě prášku zakotví na povlakovaném povrchu pouze díky své vysoké kinetické rychlosti. Vysoké rychlosti částic je docíleno speciální konstrukcí nanášecí pistole, kde částice proudí ven, směrem k povlakované součásti Lavalovou tryskou. Proud hnacího plynu dosahuje nadzvukových rychlostí a částice dopadají na povrch rychlostí až 1200 m.s⁻¹. Schéma nanášecí pistole pro CSP je na Obr. 10. a schéma principu metody na Obr. 11.



Obr. 10 – Schéma nanášecí pistole pro metodu CSP. 1 – přívod přídavného materiálu, 2 – přívod ohřátého plynu, 3 – tryska ve tvaru Lavalovy dýzy, 4 – proud urychlených částic, 5 – povlakovaný materiál. [5]

U této metody se nejčastěji jako používaný přídavný materiál volí některý z měkkých kovů a jejich slitin. Klasickým příkladem jsou Cu, Al, méně často se metoda nástřiku studeným plynem používá pro ocel a slitiny Ti, Co či Ni. Jako hnaný plyn se používá dusík, méně často nebo jen ve vzácných případech se jako hnacího média používá hélium.



Obr. 11 – Schéma principu nástřiku studeným plynem. Vlastní úprava [1]

4. Přídavné materiály

Vedle zařízení pro nanášení žárových povlaků a zvládnutí vlastní technologie povlakování má také významnou roli přídavný materiál. Je to jeden z hlavních faktorů, který nám umožňuje dosáhnout požadované kvality povlaku a tím funkčnosti celé povlakované součásti. Přídavné materiály se dělí dle jejich chemického složení, účelu a formy v jaké jsou dodávány.

4.1. Přídavné materiály z hlediska formy

Forma přídavného materiálu je dána zejména chemickým složením přídavného materiálu, mechanickými vlastnostmi a možnostmi výroby. Materiály se z hlediska formy dělí na tři základní druhy:

- přídavné materiály ve formě prášku;
- přídavné materiály ve formě drátu;
- přídavné materiály speciálních forem.

4.1.1. Přídavné materiály ve formě prášku

Přídavné materiály ve formě prášku jsou v celé oblasti žárového povlakování nejčastější z několika důvodů. Téměř všechny druhy přídavných materiálů lze vyrobit v práškové formě. Z hlediska formy práškových přídavných materiálů je důležitý tvar a velikost částic. Pro vytvoření kvalitního povlaku je potřeba aby došlo k protavení částic přídavného materiálu. S tím přímo souvisí velikost jednotlivých zrn. Velikost zrn a vlastní rozmezí velikosti zrn v objemu přídavného materiálu je určujícím parametrem definujícím kvalitu přídavného materiálu a vhodnost využití pro jednotlivé technologie žárového povlakování. Firmy, které vyrábějí přídavné materiály, udávají jako základní parametry zrnitost, intervalové rozmezí nebo procentuální poměr. Čím užší je intervalové rozmezí nebo procentuální poměr, tím je přídavný materiál považován za kvalitnější a tím pádem je také z ekonomického hlediska dražší.

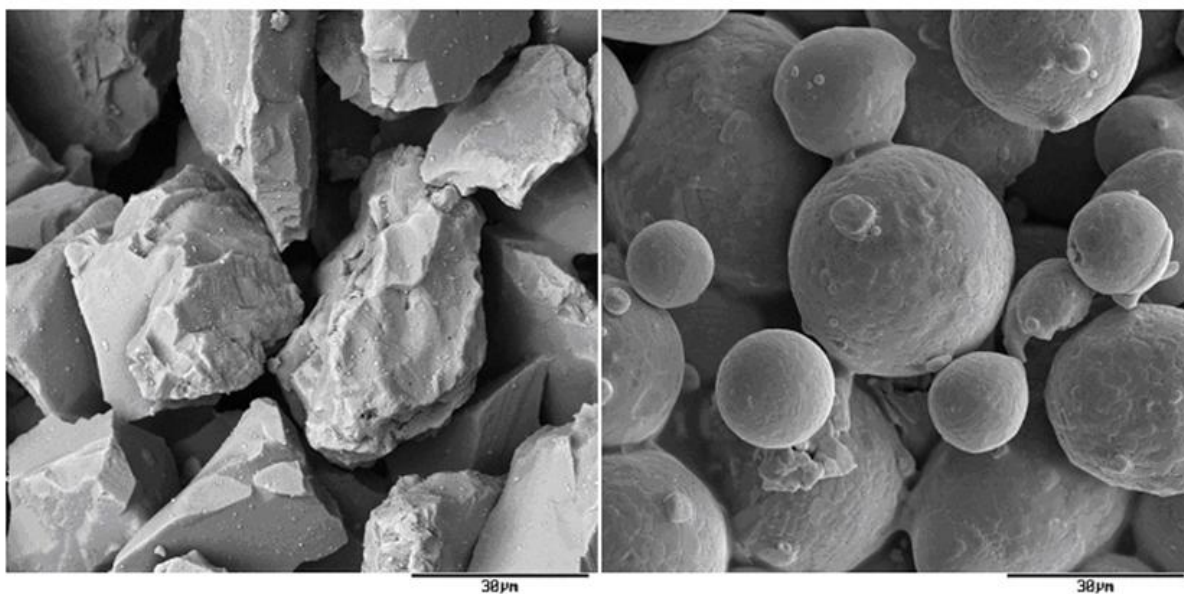
Při výběru přídavného materiálu ve formě prášku musíme brát v úvahu všechny hlediska, které mohou ovlivnit nanášený povlak. Z ekonomického hlediska se snažíme zvolit takový přídavný materiál, který je nejlevnější, ale ještě je schopen splnit požadované funkční vlastnosti. Vlastnosti naneseného povlaku jsou vždy kombinací vlastností přídavného materiálu a zvolené technologie žárového nástřiku.

Přídavné materiály ve formě prášku nejčastěji vyrábíme atomizací. Atomizace je proces, kdy je tavenina pomocí tlaku rozstříkována či rozprašována do plynného nebo méně častěji vodního prostředí. Přídavné materiály vyrobené atomizací se vyznačují nízkou pórovitostí a velmi dobrou tekutostí. Atomizací se vyrábějí zejména prášky kovové a na bázi slitin. Výhodou výroby práškových přídavných materiálů pomocí atomizace je velká produktivita a relativně nízká ekonomická náročnost, která se promítá do nižší konečné ceny prášku.

Sintrováním vyrábíme nejčastěji cermety a karbidy. Princip metody výroby přídavných materiálů sintrováním je, že bloky daného materiálu jsou rozdrceny na požadovanou velikost. Takto vyrobené prášky mají nízkou tekutost, která je dána nepravidelností jednotlivých zrn. Nepravidelnost zrn odstraňujeme úpravou prášku pomocí sferoidizace prostřednictvím plazmatu nebo kyslíko-acetylenového plamene.

Často používaná technologie pro výrobu přídavných práškových materiálů je sušení rozstříkem tzv. aglomerizace. Touto metodou lze vyrábět téměř všechny přídavné materiály oxidické, karbidické, kovové i cermetové prášky. Principiálně tato technologie spočívá ve

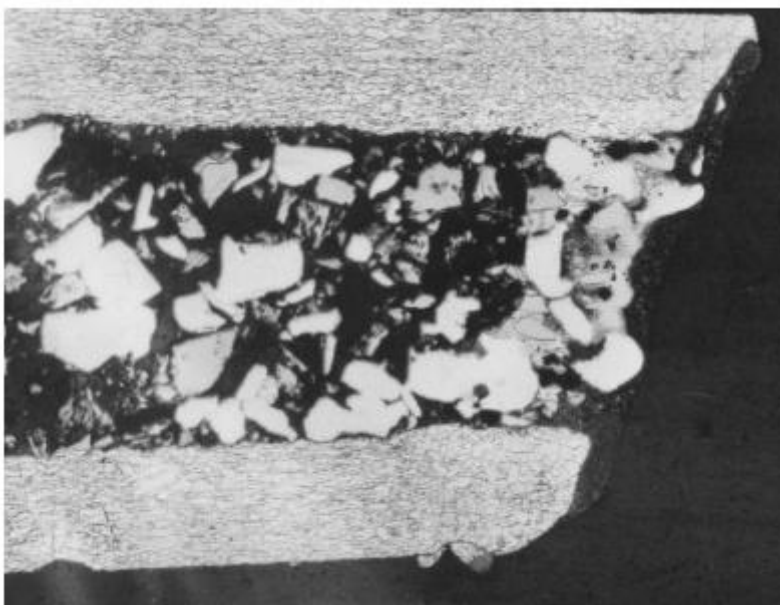
vytvoření kašovitě hmoty z daného materiálu, organického pojiva a vody. Tato kašovitá směs následně dopadá na rotující disk, kde se rozděluje hmota na jednotlivé částice. Aglomerované přídavné materiály mají relativně vysokou pórovitost, což je pro žárové nástřiky nevyhovující a proto jsou prášky dále upravovány nejčastěji pomocí plazmatu nebo jiným vhodným tepleným zpracováním.[1][7]



Obr. 12 – Litý a drcený prášek Al_2O_3 vlevo a plynem atomizovaný prášek NiCr 80%/20% vpravo [11]

4.1.2. Přídavné materiály ve formě drátu

Technologie žárového nástřiku pomocí elektrického oblouku a plamene jsou metody, které používají přídavné materiály ve formě drátu zejména pro nástřik kovových materiálů a slitin. Omezujícím faktorem výroby přídavných materiálů ve formě drátů je ten, že některé materiály nelze takto vyrobit mluvíme zde zejména o keramice nebo speciálních slitinách, které nejsou dostatečně houževnaté a tažné. Nejčastěji používané průměry drátů jsou: 1,5 mm; 2 mm; 2,5 mm; a 3,15 mm. Trubičkové dráty používáme zejména pro metodu nástřiku elektrickým obloukem. Podélný řez trubičkovým drátem je na Obr. 13. Trubičkový drát je kombinací přídavného materiálu ve formě drátu a prášku. Obal je tvořen ze slitiny a vnitřek drátu je nejčastěji vyplněn částicemi karbidů, boridů a dalších přísad.[2][8]



Obr. 13 – Podélný řez trubičkového drátu [3]

4.2. Přídavné materiály z hlediska chemického složení

Z hlediska chemického složení můžeme přídavné materiály rozdělit do čtyř základních podskupin:

- kovové přídavné materiály;
- keramické přídavné materiály;
- přídavné materiály na bázi plastů;
- speciální přídavné materiály.

4.2.1. Kovové přídavné materiály

Nejstaršími používanými přídavnými materiály jsou materiály na bázi kovové. V historii byly používány zejména v podobě drátu, dnes se ovšem vyrábí i v podobě prášku. Nejjednodušší jsou kovové nástřiky na bázi čistého kovu jako například Cr, W, Mo, Ta, Ni, Zn a Cu. Molybden se například využívá pro součásti, u kterých je vyžadována vysoká kluznost povrchu. Pro zvýšení korozní odolnosti se aplikují nástřiky Zn a Cu. Pokud potřebujeme zvýšit odolnost proti abrazi, použijeme velmi tvrdou slitinu NiCrSiB. Pro renovace strojních součástí se nejčastěji používají přídavné materiály na bázi oceli s větším obsahem uhlíku, často nad 0,4 %C a s obsahem chromu 12-17 % Cr. Další slitiny kovů se využívají dle požadavků v mnoha aplikacích od renovací, zvýšení užitečných vlastností až po čistě vizuální záležitosti.[2][11]

4.2.2. Keramické přídavné materiály

Od počátku 80. let 20. století se ve větší míře postupně začínají uplatňovat keramické materiály, je to dáno z důvodu zvládnutí technologických problémů s výrobou a vlastní technologií nanášení žárového nástřiku tak také potřebou najít materiály, které nabízejí takové užité vlastnosti jako je například větší odolnost proti opotřebení, lepší tepelně izolační vlastnosti a v neposlední řadě větší tvrdost, kterou materiály na kovové bázi nemohou dosáhnout.

Nanášené keramické přídavné materiály mohou být z oxidické, tak i neoxidické keramiky. Do této kategorie přídavných materiálů také spadají sloučeniny jako boridy, karbidy či nitridy. Většina těchto přídavných materiálů se vyskytuje ve formě prášku. Pro technologii nástřiku pomocí elektrického oblouku se v poslední době často využívá trubičkových drátů.

Mezi nejpoužívanější neoxidické keramiky patří karbidy jako TiC, SiC, B₄C a WC, silicidy MoSi₂ nebo nitridy jako například AlN. V praxi je nejčastější aplikace těchto přídavných materiálů požadavek na zvýšení tvrdosti povlakované součásti.

Mezi oxidické keramické materiály řadíme například ZrO₂, ZrSiO₄, Al₂O₃ a Cr₂O₃. Oxid zirkoničitý ZrO₂ a křemičitan zirkoničitý ZrSiO₄ se používají pro své dobré tepelně izolační vlastnosti. Často se jich využívá jako tepelných bariér při aplikaci na velmi teplotně namáhané strojní součásti jako například lopatky a spalovací komory plynových turbín, části spalovacích motorů a podobně. Oxid hlinitý Al₂O₃ a oxid chromitý Cr₂O₃ se používají pro ty součásti, u kterých vyžadujeme velkou míru odolnosti proti opotřebení a proti otěru. Oxidické keramické přídavné materiály se používají společně se stabilizátory, jako jsou například TiO₂, MgO, CaO a další. Stabilizátory stabilizují jednotlivé fáze keramického nástřiku a tím nám zajišťují námi požadované vlastnosti.[2][6][8]

4.2.3. Přídavné materiály na bázi plastů

Pro vytváření žárového povlaku z plastů využíváme přídavné materiály ve formě prášku z důvodů, že při použití plněných tyčinek nebo drátů docházelo k problémům s podáváním.

Žárovým nástřikem lze nanášet jak termoplasty, tak i termoreaktivní plasty, přičemž nejčastěji aplikovaným povlakem je polyetylen. Velikost částic přídavného materiálu ve formě prášku se ve většině případů pohybuje v rozmezí 130 až 180 μm a mají kulovitý tvar. Kvalita spojení povlaku s podložkou závisí na způsobu výroby přídavného materiálu. Pro

polyetylen vykazuje nejlepší přilnavost k podložce takový přídavný materiál, který je ve formě prášku a má střední molekulovou hmotnost.

V případě termoreaktivních plastů se používají především epoxidové pryskyřice, u nichž v průběhu aplikace nástřiku proběhnou polymerační reakce. Jako vytvrzovací látka se může použít kyselina ftalová. Pro nanášení termoreaktivních povlaků se doporučuje předeheat povlakovanou součást na teploty v rozmezí 80 až 170 °C z důvodů toho, aby polymerizační reakce proběhla v celém rozsahu.

Nejčastější technologií používanou pro nanášení povlaků na bázi plastů je žárový nástřik plamenem. Mimo běžné zařízení pro žárové nástřiky plamenem se používají a vyrábějí speciální zařízení pro nástřik plastů.[2][8]

4.2.4. Speciální přídavné materiály

Cermety jsou přídavnými materiály patřícími do skupiny speciálních přídavných materiálů pro žárové nástřiky. Cermety jsou hojně využívány pro svoje vlastnosti, které kombinují houževnatost. Tu cermetu dodává kovová složka a odolností proti vysokým teplotám, proti opotřebení a vysokou tvrdostí, kde nám tyto vlastnosti zaručí keramická složka. Nejčastěji používané cermety jsou například WC+C 10% a Cr₃C₂+NiCr 25%.

Do speciální skupiny přídavných materiálů patří i materiály s exotermickými účinky. Jedná se o materiály na bázi Ni-Al a Ni-Ti. Tyto materiály se využívají pro zvýšení adheze vrstvy k podkladovému materiálu.[2][8]

5. Vlastnosti povlaků a jejich zkoušení

Vlastnosti nanesených povlaků technologií žárového nástřiku lze rozdělit na dvě základní skupiny:

- obecné vlastnosti – sledují se vždy u všech druhů a typů povlaků;
- speciální vlastnosti – sledujeme pouze za předpokladu využívání nástřiku ve specifických pracovních podmínkách.[2]

5.1. Vzhled povlaků

Kontrola vzhledu povlaků se provádí buď prostým okem, nebo pomocí lupy. Požadavky na nanesený povlak při vizuální kontrole jsou zejména souvislý a rovnoměrný vzhled. Zrnitost povlaku závisí na použité technologii žárového nástřiku a formě přídavného materiálu. Přídavný materiál ve formě drátu obvykle způsobuje drsnější povrch než materiál přiváděný ve formě prášku. Zrnitost můžeme ovlivňovat použitím prášku s menší zrnitostí. Při

vizuální kontrole hledáme zejména viditelné póry, puchýře a trhliny. Nanesený povlak se nesmí odlupovat zejména na hranách a okrajích.[2]

5.2. Tvrdość povlaků

Vytváření povlaků za zvýšením tvrdosti povrchu povlakované součásti je velmi častá aplikace žárových nástřiků. V ČSN EN ISO 14 923 se uvádí pouze měření mikrotvrdosti povlaku metodou Vickerse a Rockwella dle ČSN EN ISO 6507-1, resp. 6508-1. V USA se nejčastěji využívá pro stanovení tvrdosti naneseného povlaku metoda Knoop.

Výsledná hodnota mikrotvrdosti se vypočte jako výběrový průměr nejméně pěti měření a doplní se vhodným statistickým zpracováním. U každého protokolu měření musí být uvedeno několik faktických údajů, které dokumentují průběh zkoušky a zkušební podmínky s odkazem na příslušný normativ. Údaje, které musí být uvedeny, jsou zejména druh zkušebního zařízení, způsob statistického zpracování údajů a pokud bylo měření provedeno na vícefázových strukturách, musí být uvedena příslušná fáze, ke které jsou naměřené hodnoty tvrdosti vztaženy.[1][8]

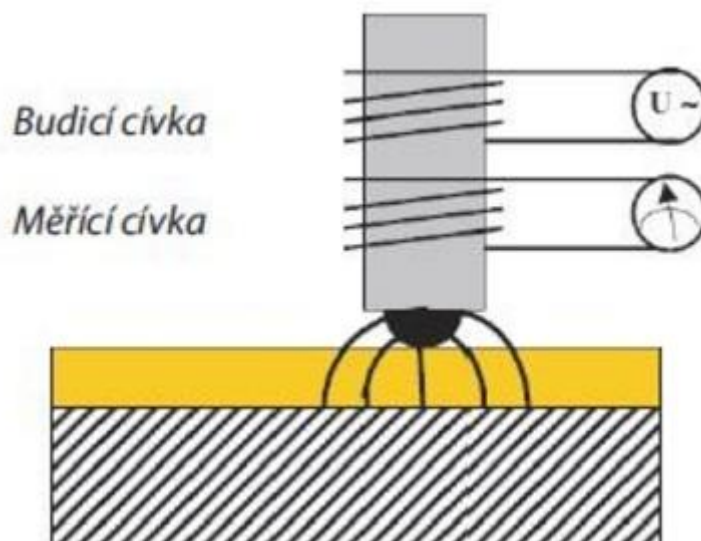
5.3. Tloušťka povlaků

Vlastní tloušťku naneseného povlaku lze měřit destruktivními nebo nedestruktivními metodami. Možnost použití různých měřících metod závisí na tom, zda se jedná o magnetický či nemagnetický nástřik nanesený na magnetické či nemagnetické povlakované součásti. Pro destruktivní zkoušení tloušťky nanesených povlaků hovoří zejména její přesnost, nevýhoda je poškození součásti.

Destruktivní zkoušení tloušťky naneseného povlaku spočívá v mikroskopickém měření tloušťky povlaku na výbrusu, který je zhotoven kolmo povlakem při vhodném zvětšení. Tloušťka se měří s vysokou přesností na každých 100 mm řezu, ideálně v 10 místech rozložených pravidelně podél řezu a měřených kolmo na rovinu základního materiálu. Při přípravě zkušebního vzorku je potřeba dodržet několik zásad aby nedošlo ke zkreslení naměřených hodnot. Při rozřezávání vzorku nesmí nastat odtržení povlaku a nesmí dojít k poškození hran. Protokol o zkoušce musí obsahovat základní údaje o způsobu měření, použitém vybavení a způsobu statistického zpracování naměřených hodnot.

Způsoby nedestruktivního měření tloušťky povlaku jsou uvedeny v ČSN EN ISO 14 923. Stanovení místní tloušťky můžeme provést pomocí posuvného měřidla nebo mikrometru. Tento způsob je spíše orientační a dosti nepřesný. Mezi přesné, ale náročné nedestruktivní metody zkoušení tloušťek povlaků řadíme dle ČSN EN ISO 14 923 například

metody vířivých proudů, mnohosvazkové interferometrie dle Fizeana, odporovou metodu nebo magnetickou metodu, která je zobrazena na Obr. 14.



Obr. 14 – Princip magnetické metody [9]

Princip magnetické metody je, že měřicí sonda obsahuje feromagnetické jádro a budicí vinutí napájené střídavým proudem o nízké frekvenci. Sonda vytváří ve svém okolí nízkofrekvenční střídavé elektromagnetické pole. Pokud se v blízkosti sondy vyskytuje feromagnetický materiál, pole sondy se zesílí. Toto zesílení měříme druhou snímací cívkou a odpovídá vzdálenosti feromagnetického podkladu od sondy. Magneticko-indukční metoda nedestruktivního měření tloušťky je založena na principu vyhodnocování intenzity vybuzeného elektromagnetického pole, které je funkcí tloušťky.

Magneticko-indukční metoda se uplatňuje jako informativní, orientační pro nejjednodušší pohotovostní provozní kontrolu, avšak pro svou jednoduchost a relativní přesnost je také nejpoužívanější. Metoda magnetické indukce umožňuje měření všech nemagnetických vrstev (např. zinek, chrom) na magnetickém podkladu (např. ocel). Základní postup měření je uveden v normě ČSN ISO 2178 Nemagnetické povlaky na magnetických podkladech.[1][2][9]

5.4. Měření pórovitosti povlaků

Porosita má ve výsledné struktuře naneseného povlaku značný podíl na výsledné užité a kvalitativní vlastnosti. Obecně je uváděno, že čím větší porosita, tím menší odolnost proti mechanickému opotřebení a nižší tvrdost. Vysoký počet nenatavených nebo částečně natavených částic v povlaku je spojován s odlupováním či praskáním vrstev. Porosita

přesahující 10% usnadňuje korozi, popřípadě korozi základního materiálu součásti, protože malé póry jsou vlastně průchozí kanálky, které spojují základní materiál s okolím.

Pórovitost definujeme stupněm nepokrytého podkladu, množstvím pórů a jejich velikostí. Velikost pórů je rozdělena do tří základních skupin:

- makroskopické póry větší než 100 μm ;
- mikroskopické póry velikosti 1 až 100 μm ;
- submikroskopické póry velikosti 0,001 až 0,01 μm .

K vlastnímu měření pórovitosti využíváme různé způsoby vizuální kontroly a vyhodnocování nebo metody měření, které využívají chemické reakce zkušebního prostředí, kapalného či plynného, s materiálem základu.[8]

V praxi velmi používaná fluorescenční penetrační metoda se využívá k detekci trhlin a pórů u nejrůznějších nanášených povlaků. Princip metody spočívá v nanesení detekční kapaliny na zkoumaný povrch. Detekční kapalina se skládá z barviva a nosné kapaliny. Barvivo je schopné vyzařovat ve viditelném spektru, při vhodném osvětlení ultrafialové záření. Kapalina díky kapilárním silám zateče do trhlin a pórů a zbylá kapalina na povrchu se setře. Následně se vzorek v temné komoře nasvítí ultrafialovým zářením a dále se pozoruje při 3 až 5 násobném zvětšení. Trhliny a póry obsahující barvivo se zviditelní proti tmavému pozadí a je pak následně možno určit tvar, počet a polohu trhlin.[1]

Dalším způsob vyhodnocení pórovitosti je použití přístroje pro kvantitativní metalografickou analýzu – kvantimet.[2]

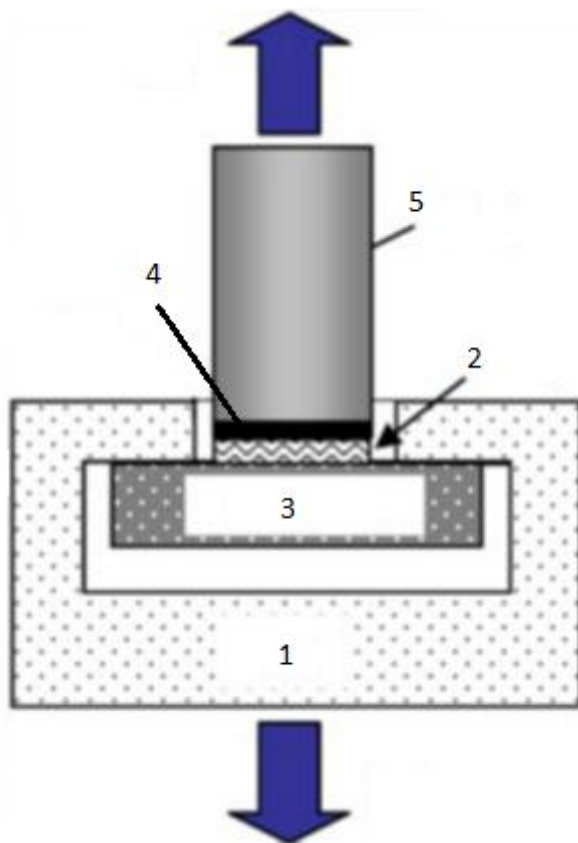
5.5. Drsnost povrchu povlaků

V některých případech aplikace žárového nástřiku je povrch ponechán v původním stavu a v mnoha dalších případech se provádí mechanické obrábění, nejčastěji leštění či broušení. V obou zmíněných případech jsou dány požadavky na určitou drsnost povrchu povlaku. Drsnost povlaku je ovlivněna technologií zhotovení, technologickými parametry nástřiku a velikostí zrn použitého přídavného materiálu.

Drsnost povrchu povlaků se zpravidla hodnotí R_a a R_{max} podle ČSN EN ISO 4287. Pro vypovídající údaj se u žárových povlaků doporučuje uvádět poměr drsností R_{max}/R_a .

5.6. Přílnavost povlaků k podložce

Přílnavostí povlaku k podložce rozumíme takovou sílu, která je nutná k odtržení povlaku od podkladu na dané ploše. Hodnoty přílnavosti povlaků na podložku jsou velmi sledované a žádané. Pro vlastní měření přílnavosti povlaků vytvořených žárovým nástřikem existuje mnoho zkušebních metod, některé jsou normalizované, některé vycházejí ze smluvních dohod nebo z podnikových praxí. Valná většina zkoušek na přílnavost povlaků je založena na podobných principech, avšak některé z nich se liší ve směru působící síly. V našich podmínkách je nejčastěji používaná metoda dle ČSN EN 852 Žárové stříkání – Stanovení přílnavosti v tahu. Schematicky je metoda znázorněna na Obr. 15.



Obr. 15 – Schéma zkoušky přílnavosti v tahu. 1 – část přípravku, 2 – nanesený povlak, 3 – spodní zkušební tělísko, 4 – vrstva epoxidové pryskyřice, 5 – horní zkušební tělísko. [1]

Postup metody zkoušení přílnavosti povlaku je, že na zkušební tělísko se nanese zkoušený povlak rovnoměrné tloušťky. Tělísko s povlakem se slepí epoxidovou pryskyřicí nebo jiným vhodným lepidlem, s čelní plochou protikusů. Slepené tělísko se upne do vhodného přípravku, který zajistí souosost. Vlastní zkouška probíhá na trhačím stroji

nejčastěji s rozsahem stupnice do 50 000 N při rychlosti zatěžování do 0,5 m.min⁻¹ a zaznamenává se celková síla k odtržení protikusu od tělíska s naneseným povlakem.

Výsledná hodnota přilnavosti se vyjadřuje nejčastěji jako aritmetický průměr z pěti měření. Nevýhodou většiny zkoušek přilnavosti povlaků je, že nelze vzájemné hodnoty porovnávat, zejména pokud použijeme jiné průměry zkušebních vzorků.

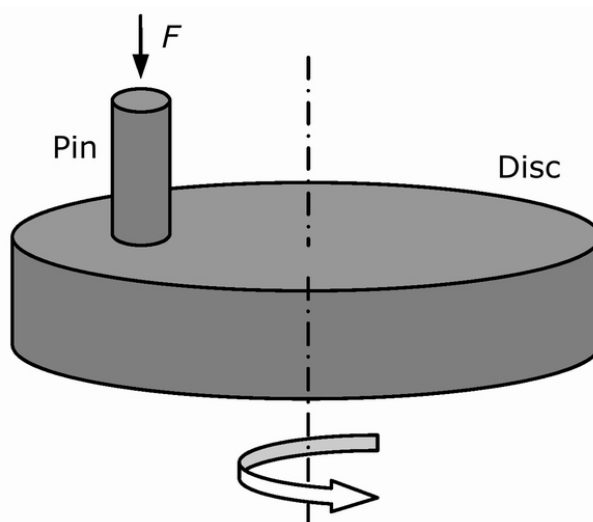
5.7. Odolnost proti opotřebení

Opotřebení se projevuje jako nežádoucí změna povrchu nebo rozměru tuhého tělesa, které vzniklo vzájemným působením funkčních povrchů nebo funkčního povrchu a média, které opotřebení vyvolává. Opotřebení patří mezi nejčastější důvody mechanického poškození strojních součástí.

Opotřebení se projevuje jako postupné odstraňování materiálu z funkčních ploch součásti mechanickými účinky působících sil. Proces je často doprovázen okolními chemickými nebo elektrochemickými vlivy.

Žárové povlaky jsou nejčastěji opotřebovány abrazivním opotřebováním. Jedná se o druh opotřebení, kde se částice jednoho materiálu oddělují účinkem druhého tvrdého a drsného povrchu nebo mohou být mezi dvěma povrchy jiné cizí volné tvrdé částice. Vzájemným pohybem dvou součástí dochází k rýhování a tím k poškození povrchu jedné nebo obou součástí. Pokud je opotřebení velmi silné, je vidět pouhým okem.

Žárové povlaky jsou zkoušeny nejčastěji metodou PinOnDisk. Princip této metody je založen na vtlačování tělíska do povlakovaného materiálu předem definovanou silou. Zkoumaný povlakovaný materiál rotuje a má nejčastěji tvar disku. Tělísko vytváří do zkušebního vzorku kruhovou drážku, podle které se následně vyhodnocují tribologické vlastnosti. K vyhodnocení se používá elektronový nebo světelný mikroskop. Profil stopy se vyhodnocuje profiloměrem, nebo pomocí světelného mikroskopu s vhodným softwarem.[1]



Obr. 16 – Schéma principu metody Pin on Disc [1]

6. Vlastnosti povlaků aplikovaných jako TBC

Technologie žárových nástřiků pro aplikaci tepelných bariér využíváme tam, kde potřebujeme zvýšit užité vlastnosti dílů namáhaných vysokoteplotní aplikací. Klasickým příkladem jsou lopatky plynových turbín či písty spalovacích motorů. Zvýšení teplotní odolnosti povlakovaných součástí vede k možnosti zvýšit provozní teploty a tím zvýšit celkovou účinnost zařízení. Z ekonomického hlediska se prodlužuje doba životnosti součástí a tím se snižují náklady na údržbu, renovaci nebo na celkovou výměnu.

Tepelných bariér využíváme také jako ochranu základního materiálu proti oxidaci, tepelným rázům, vysokoteplotní korozi a vysokým teplotám.

6.1. Odolnost povlaků proti korozi za vysokých teplot

Korozí obecně nazýváme jev, kdy dochází k postupnému fyzikálnímu rozrušování materiálu vzájemným působením prostředí a materiálu. Odolnost určitého materiálu proti korozi je relativní, vždy záleží na druhu prostředí a na souboru fyzikálních a chemických podmínek.

Požadavek na odolnost proti korozi za vysokých teplot je požadavek specifický pro úzkou oblast strojních součástí. Lopatky plynových turbín, leteckých motorů a spalovací komory jsou aplikace, na kterých se z velké části jako ochrana proti korozi za vysokých teplot využívají tepelné bariéry nanášené žárovým stříkáním.

Významným přínosem v řešení ochrany základních materiálů proti vysokým teplotám a korozi byl objev, že houževnatost a adheze oxidu chromitého a hlinitého je možno zvýšit

přidáním malého množství prvku s vysokou afinitou ke kyslíku jako například tantal, yttrium, nebo přidáním vzácných kovů jako jsou například rhodium a platina.

Povlaky s obsahem výše zmíněných prvků se dají vytvářet řadou technologií při použití různých druhů a tvarů přídavných materiálů. Nejčastější je ovšem metoda plasmatického nástřiku, která nám zaručí dostatečné natavení a urychlení částic.[6][10]

6.2. Odolnost povlaků proti žáru

Žárovzdornost můžeme definovat jako odolnost materiálu proti oxidaci za vyšších teplot. Oxidace povrchu materiálu se projevuje vznikem oxidické vrstvy na povrchu materiálu. U nízko a středně legovaných ocelí je příčinou snížení odolnosti proti žáru oxid FeO, který přiléhá k povrchu oceli a přes který mohou snadno difundovat atomy kyslíku k povrchu oceli. Cílem žárového nástřiku k zvýšení odolnosti proti žáru tedy je, zamezit nebo zcela potlačit difuzi kyslíku přes nanesený povlak.

Praktické aplikace se dostalo zavedením samotěsnících povlaků. Při použití povlaků s obsahem chromu, které jsou velmi odolné proti tepelným napětím, mechanickým napětím, chemickému napadení kyslíkem a plyny využíváme té vlastnosti, že chrom podléhá částečně oxidaci na povrchu součásti a vzniká oxid chromu. Oxidická vrstva obsahuje kovové jádro a je z hlediska difuze nepropustná.

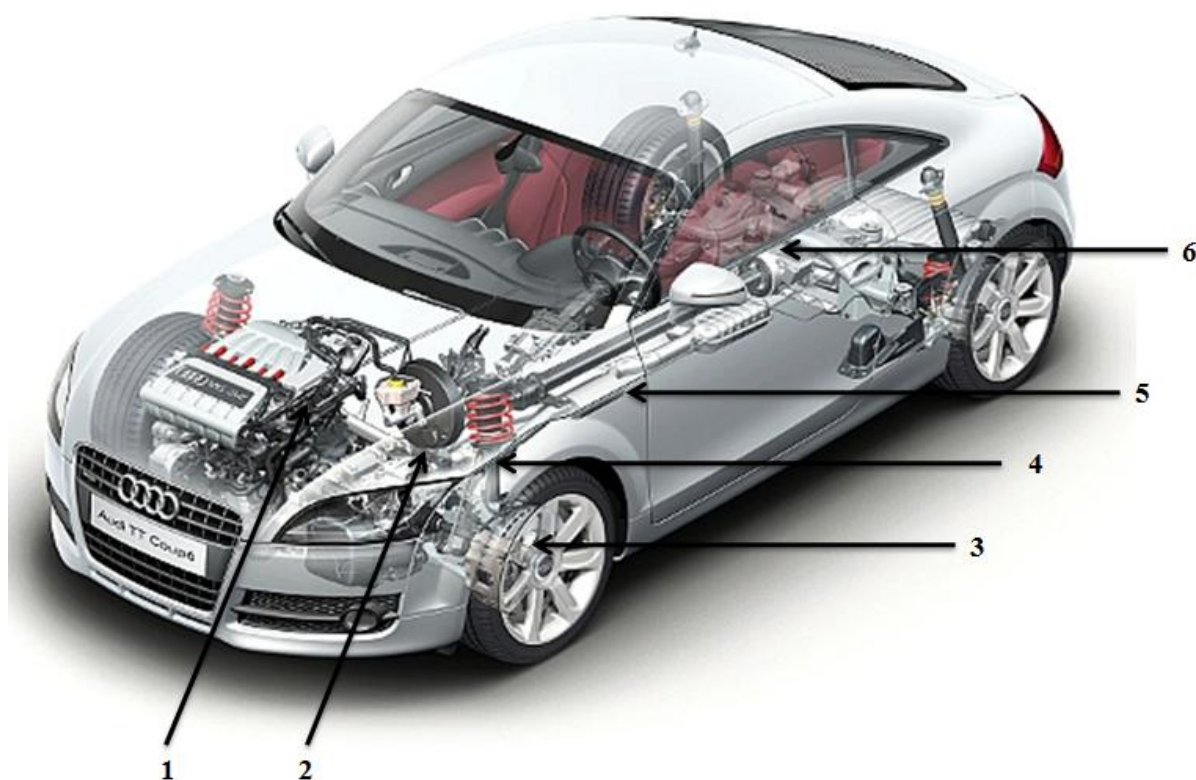
Pokud je požadováno, aby povlak kromě odolnosti proti žáru plnil také funkci tepelné bariéry, provede se na ochranném povlaku z chromu ještě nástřik keramický, který přebírá funkci tepelné bariéry. Úskalím tohoto způsobu je náročnost zaručení dobrého spojení mezi jednotlivými nanesenými vrstvami.[2][10]

7. Materiály a jejich aplikace metodou HVOF pro dopravní techniku

7.1. Aplikace v automobilovém průmyslu

Technologie žárového stříkání povlaků je používána v automobilovém průmyslu v Evropě, Asii i na Severoamerickém kontinentě. Původně se využívání žárových nástřiků vyžívalo pouze pro renovace, zejména renovace součástí motorů, ale aktuálně se aplikují žárové nástřiky i v prvovýrobě. Důvodů pro použití žárových nástřiků je několik. Použití bloků motorů se slitin hliníku nutně muselo vést k hledání způsobu jak zajistit dlouhodobou funkčnost válců motoru, jako vhodné řešení se ukázalo použití metody HVOF pro nástřik povlaku z materiálu, který je složen s karbidu wolframu a kobaltu. Tlak na úsporu pohonných hmot vedl automobilový průmysl, zejména v Evropě a Japonsku, ke snaze snížení hmotnosti

automobilů. Vývoj nových vysoko-pevných materiálů pro nosnou konstrukci byl jedním ze způsobů k úspoře hmotnosti. Druhým způsobem je výroba tenčích součástí z lehčích materiálů a dodáním požadovaných užitečných vlastností pomocí žárového nástřiku. Typickou ukázkou je výfukové potrubí, kde došlo k ztenčení vlastního tělesa, ale také tím klesla odolnost proti okolním vlivům. Nástřik povlaku z materiálu chrom + karbid železa a slitiny hliníku zajistí odolnost proti vysokým teplotám a zamezí vzniku koroze. Schematicky jsou součásti, kde se využívá metody HVOF v automobilovém průmyslu znázorněny na Obr. 17.



Obr. 17 – Aplikace metody HVOF v automobilovém průmyslu. 1 – pístové kroužky, válce, vačkové hřídele, 2 – části převodového ústrojí, 3 – brzdové kotouče, 4 – tlumiče a hydraulika, 5 – části výfukové soustavy, 6 – části náprav. [11]

7.1.1. Materiály vhodné pro HVOF nástřik pístních kroužků

Pístní kroužky jsou částí motorového pístu, která má za úkol utěsnit spalovací prostor a oddělit ho od spodní části motoru, kde se nachází olejová náplň a klikový hřídel. Samotný píst se musí volně pohybovat ve vložce válce a nemůže být tím pádem příliš těsný. Současně je také namáhaný stranově kvůli samotné konstrukci převodu pohybu pístu na klikový hřídel pomocí ojnice. Pokud by píst kroužky neměl, zapálená směs paliva by jej obtékala až do klikové skříně a současně by olejová náplň ze skříně protékala do spalovacího prostoru. Pístní

kroužky tedy tvoří dynamické utěsnění pístu při jeho pohybu válcem při pracovním cyklu. Musí tedy pojmout rozdíly v úhlech naklonění pístu během jeho pohybu mezi dolní a horní úvratí a dále také změny rozměrů, které jsou způsobeny velkými teplotními výkyvy spalovacího motoru při jeho provozních podmínkách. V ideálním případě by pístní kroužky měly být schopné udržet olejový filtr na svém povrchu.

Aplikované materiály, které se používají pro nástřik metodou HVOF na pístní kroužky jsou zejména slitiny chromu a kobaltu, které zaručí odolnost proti otěru a jsou teplotně stálé i za teplot ve kterých běžně pracují spalovací a vznětové motory. Molybden používáme na ty pístní kroužky, u kterých požadujeme na jejich povrchu vytvořit souvislý olejový filtr. Nástřik z molybdenu nám toto umožní tím, že povlak je velmi porézní.[1][8]

7.1.2. Materiály vhodné pro HVOF nástřik stěn válců spalovacího motoru

Stěny válců spalovacích motorů jsou namáhány jak na otěr od pístních kroužků tak musí být schopny vydržet velké teplotní rozdíly od studeného rozběhu v mrazech až po teplotu pracovního cyklu. Konstrukce spalovacích motorů postupně vedla od litinových, ocelových po hliníkové bloky motorů. Žárové nástřiky se dají aplikovat na každou z výše zmíněných variant. Pro litinové a ocelové bloky je to v případě renovací jejich vložek. Pro bloky motorů ze slitin hliníku je již žárový nástřik nanášen v prvovýrobě. Povlak z molybdenu se používá zejména pro jeho vysokou pórovitost, která nám zaručí vytvoření tenkého olejového filmu na povrchu stěny válce. HVOF nástřikem se aplikují zejména materiály složené s karbidu wolframu a kobaltu, případně směs prášku ve složení karbidu wolframu, kobaltu a chromu. V některých případech je nanášen pomocí HVOF nástřiku i prášek složený z CoNiCrAlY nebo MoCrAlY, který nám zajistí mimo vysoké otěruvzdornosti, stálosti za vysokých teplot i funkci tzv. tepelné bariéry.[1]

7.1.3. Materiály vhodné pro HVOF nástřik výfukové soustavy spalovacího motoru

Výfukové potrubí tvoří nedílnou součást každého dopravního prostředku, který k pohonu využívá spalovací motor. Výfuková soustava je vystavena extrémním vlivům jak okolí tak přímo samotným odvodem horkých spalin z motoru. Požadavky na nanášený povlak jsou tedy odolnost proti korozi a odolnost proti vysokým teplotám. Nástřik výfukového potrubí se provádí jak při prvovýrobě, tak i při renovacích. Nejčastěji se používají přídavné materiály na bázi hliníkových slitin nebo slitiny niklu a chromu.[1][8]

7.1.4. Materiály vhodné pro HVOF nástřik částí převodového ústrojí

Jednotlivé díly převodových skříní jsou namáhány zejména na otěr, proto musí nanášené povlaky vykazovat velkou otěruvzdornost a zajistit minimální tření při odvalování ozubených kol a jiných částí převodového ústrojí.

Často aplikovaný materiál pro povlakování dílů převodového ústrojí je molybden nebo slitiny chromu, niklu s kobaltem. Pro renovace se používají slitiny NiCr nebo MoNiCr.[2]

7.1.5. Materiály vhodné pro HVOF nástřik brzdových kotoučů

Brzdové kotouče jsou v automobilech či jiných dopravních prostředcích zatěžovány třecími silami a velkými výkyvy teplot a při dlouhém stání dopravního prostředku i korozi. Nároky na brzdové kotouče jsou tedy odolnost proti vysokým teplotám a odolnost proti mechanickému opotřebení.

Jako výchozí materiál na výrobu brzdových kotoučů se nejčastěji používá šedá litina legovaná Cr pro větší tvrdost. Povlaky a brzdové kotouče se nejčastěji nanášejí plasmou nebo pomocí metody HVOF. Technologií HVOF se nanáší zejména dvouvrstvý nástřik, kde spodní pojící matice je tvořena NiCr a vrchní je vytvářena nástřikem z materiálu, který je tvořen velmi tvrdými karbidy Cr_3C_2 . [1]

7.2. Ostatní aplikace materiálů metodou HVOF na součásti pro dopravní techniku

Z oblasti letecké dopravy jsou prezentovány zejména příklady ochranných vrstev na kluzných plochách hydraulických válců podvozků nebo různých ústrojí pro změnu nastavení křidel. Zde dominují tvrdokovy WC-Co a WC-Co-Cr. Jako nejdůležitější kritéria volby jsou uváděny nízké vnitřní pnutí po nástřiku vrstvy a vysoká odolnost vůči únavě. Pro turbínové a tryskové motory letadel se většina povlaků nanáší plasmou, ale některé povlaky lze nanášet i metodou HVOF. Mezi materiály, které se nanáší metodou HVOF na součásti turbín patří zejména karbid wolframu + 17% kobaltu či karbid wolframu + 10% kobaltu a 4% chromu. Tyto přídatné materiály mají po nanesení velmi dobrou odolnost proti korozi a proti opotřebení. Hraničním materiálem nanášeným metodou HVOF je MCrAlY, který se aplikuje na lopatky tryskových motorů, ale i na lopatky stacionárních plynových turbín, kde se také často používají superslitiny NiCrAlY nebo CoCrAlY, které mají výbornou odolnost proti korozi za vysokých teplot.

V železniční dopravní technice se žárových nástřiků využívá obdobně, jako v automobilovém průmyslu a to pro renovace, kde využíváme příhodných vlastností materiálů

nanášených pomocí žárového nástřiku. Na příklad na opotřebované kloubní spojení tramvajových vozů či trolejbusů se nanáší povlaky karbidu wolframu + chromu a kobaltu, nebo v prvovýrobě u elektromotorů, kde se na vnitřní součásti nanáší vrstvy tepelných bariér z materiálu MCrAlY.

V lodním průmyslu, který sice není u nás významně rozvinut, ale mnoho tuzemských firem se zúčastní zahraničních projektů v roli subdodavatelů, jsou aplikovány ochranné povlaky žárovým nástřikem na součásti a sestavy, které jsou dále používány v podmínkách vysoce korozivního prostředí. Pro ochranu proti korozi nejčastěji aplikujeme materiály na bázi slitin chromu, niklu a hliníku.[1][2][8][11]

8. Praktická část

8.1. Představení společnosti DTD Future Brno s.r.o., ve které se renovace kloubového spojení realizuje

Společnost s ručením omezením DTD Future Brno byla založena v roce 2004. Hlavními obory podnikání jsou renovace a kovovýroba do různých průmyslových odvětví jako energetika, chemický průmysl, dopravní technika apod. Firma je vybavena zařízením pro nanášení žárových nástřiků a to pomocí technologií nástřiku plamenem, vysokorychlostního nástřiku plamenem (HVOF), nástřiku elektrickým obloukem a plasmou.

Firma DTD Future Brno je dále vybavena strojním parkem pro rozsáhlou kovovýrobu od kusových zakázek po výrobu sériovou. V roce 2007 byla firma certifikována dle mezinárodních norem ISO 9001:2001 a v roce 2011 proběhla recertifikace na certifikát jakosti ISO 9001:2009.[11]

8.2. Využití žárového nástřiku na renovaci kloubového spojení trolejbusu

Renovované kloubové spojení žárovým nástřikem je typu Hubner. Nejčastější využití tohoto typu spojení je na kolejových vozech a soupravách, ale v určitých případech se využívá i pro spojení přední a zadní části trolejbusového vozu. Toto renovované spojení je v současnosti používáno na trolejbusech, které jsou označeny Tr22 a jsou používány Dopravním podnikem města Brna.

K renovaci kloubového spojení se přistoupilo z ekonomických důvodů neboť, nákup a montáž nového spojení je řádově několikrát dražší.

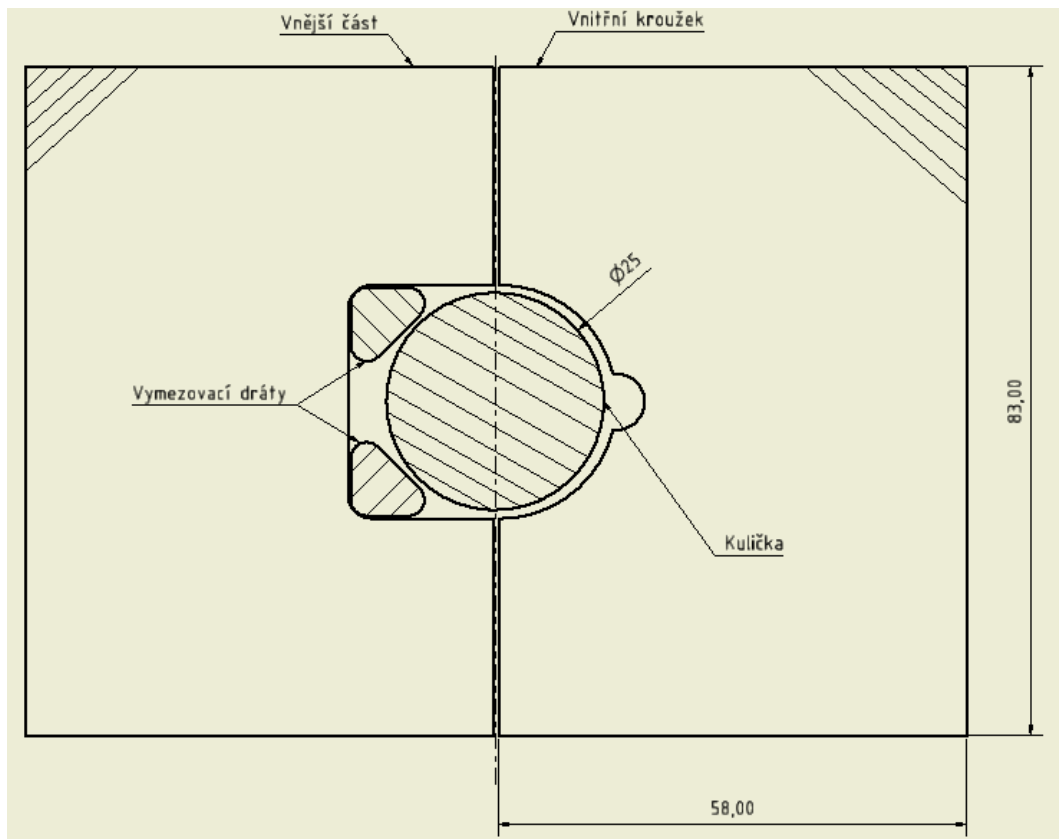
Kloubové spojení typu Hubner se skládá z několika částí, na Obr. 18 vlevo je část, která je šrouby napevno spojena s přední částí vozu. Obr. 18 vpravo ukazuje druhou hlavní

část kloubového spojení, která je připevněna na silentblocích k druhému vozu trolejbusu ve směru jízdy.



Obr. 18 – Vlevo pevná část spojení, vpravo část upevněná na silentblocích

Dalšími částmi jsou čtyři dráty, po kterých se odvalují kuličky. Kuličky se zároveň odvalují na vnitřním kroužku. Principiálně se jedná o ložisko s kosoúhlým stykem. Schéma řezu kloubového spojení je zobrazeno na Obr. 19.



Obr. 19 – Schematický řez kloubového spojení

8.3. Vznik opotřebení

Kloubové spojení typu Hubner se využívá zejména u kolejových vozidel. Stavebními a provozními předpisy pro stavbu železničních a tramvajových těles jsou dány i parametry typu: minimální průměr zatáčky, minimální či maximální sklon tělesa apod. Toto ovšem u provozu trolejbusu neplatí. Pohybuje se po běžné silniční komunikaci, proto vlivem malých poloměrů zatáček, kruhových objezdů, velkých zlomů převýšení či nevhodně umístěných zastávek vzniká opotřebení kloubu o dost větší než při použití u kolejového vozidla.

Při průjezdech kruhovými objezdy a při průjezdech zlomů převýšení dochází k velké deformaci pryžových prvků. Pryžové silentbloky jsou schopny snést deformace do +/- 5° náklonu. Vlivem deformací silentbloků se krouticí moment a síly mezi zadní a přední částí trolejbusu přenáší až na kloubové spojení, které je tím to zatíženo větší silou a momenty, než na které bylo původně zkonstruováno. Při malém poloměru zatáčky nebo při nájezdu do prudkého klesání či stoupání se vodící dráty vlivem velké síly z kuličkových těles deformují a jsou vtlačovány do vnější části kloubového spojení. Pohyb kuličkových těles, který má být rotační, se mění na pohyb posuvný. Při provozu trolejbusového vozu se tato situace opakuje poměrně často, a proto se postupně vydrou na vnější části kloubu drážky. Kloub s vydřenými drážkami je hlučnější, hluk proniká do prostoru pro cestující a jízda je tím méně komfortní a také se vzrůstajícím opotřebením vzniká rychlejší únava pryžových silentbloků.

8.4. Použité materiály na renovaci kloubového spojení

Jako vhodné materiály pro tuto renovaci byly vybrány slitiny materiálů NiTi a NiTi+Fe. Žárový nástřík je dvouvrstvý, spodní vrstva, nanášená přímo na těleso kloubu, které je umístěno na silentblocích je slitina NiTi a vrchní, funkční vrstva je z materiálů NiTi+Fe.

Důvod aplikace dvouvrstvého žárového nástříku je ten, že přídatný materiál NiTi má lepší přilnavost na surový povlakovaný povrch a také, že slitina NiTi+Fe má lepší odolnost proti opotřebením, nižší poróznost, která v konečném důsledku snižuje tření, opotřebení a hluk z odvalování kuličkových těles.

8.5. Postup renovace kloubového spojení

Nástřík žárového povlaku se z technologického a konstrukčního hlediska dá realizovat pouze na vnější části kloubového spojení. Nástřík těchto ploch je velmi složitý. Musí se zajistit dokonalé odmaštění od tuků a maziv a také se musí zajistit odstranění veškerých jiných nečistot. Plocha se musí očistit od ořepů, které vznikly třením mezi vodícím drátem a

stěnou kloubu. Žárový nástřík se musí stříkat ze spodní i horní hrany tak aby byla zajištěna rovnoměrnost povlaku po celém povrchu renovovaných částí kloubového spojení.



Obr. 20 – Realizace nástříku segmentu kloubu vlevo a vpravo hotový nástřík

K renovaci střední části kroužku a vodících drátů nelze přistoupit jako k vnější části a využít žárového stříkání. Střední kroužek je třeba vybrousit na nový požadovaný rozměr a vyrobit nové dráty a kuličky. Vodící dráty se obrábějí ve speciálním rotačním přípravku a po obrábění následuje tepelné zpracování, kalení a popouštění aby se dosáhlo přijatelné tvrdosti a houževnatosti.

8.6. Výstupní kontrola

Konečná výstupní kontrola součástí po renovaci žárovým nástříkem se provádí vizuálně a hledají se případné trhliny, nenanesené plošky nebo bubliny. Provede se rozměrová kontrola všech součástí i obráběných a změří se tloušťka povlaku. Po kontrole následuje montáž celku kloubu a expedice k zákazníkovi.



Obr. 21 – Část segmentu kloubu po renovaci, která je připravena k expedici k zákazníkovi

8.7. Metodika hodnocení mikrostruktury povlaku

Hodnocení mikrostruktury povlaků se provádí ke zjištění vlastností povlaků, výběru nejvhodnějších technologických parametrů a určení životnosti povlaků. Z popisu mikrostruktury vzorku, na kterém je nanesený povlak by měly být známe tyto informace:

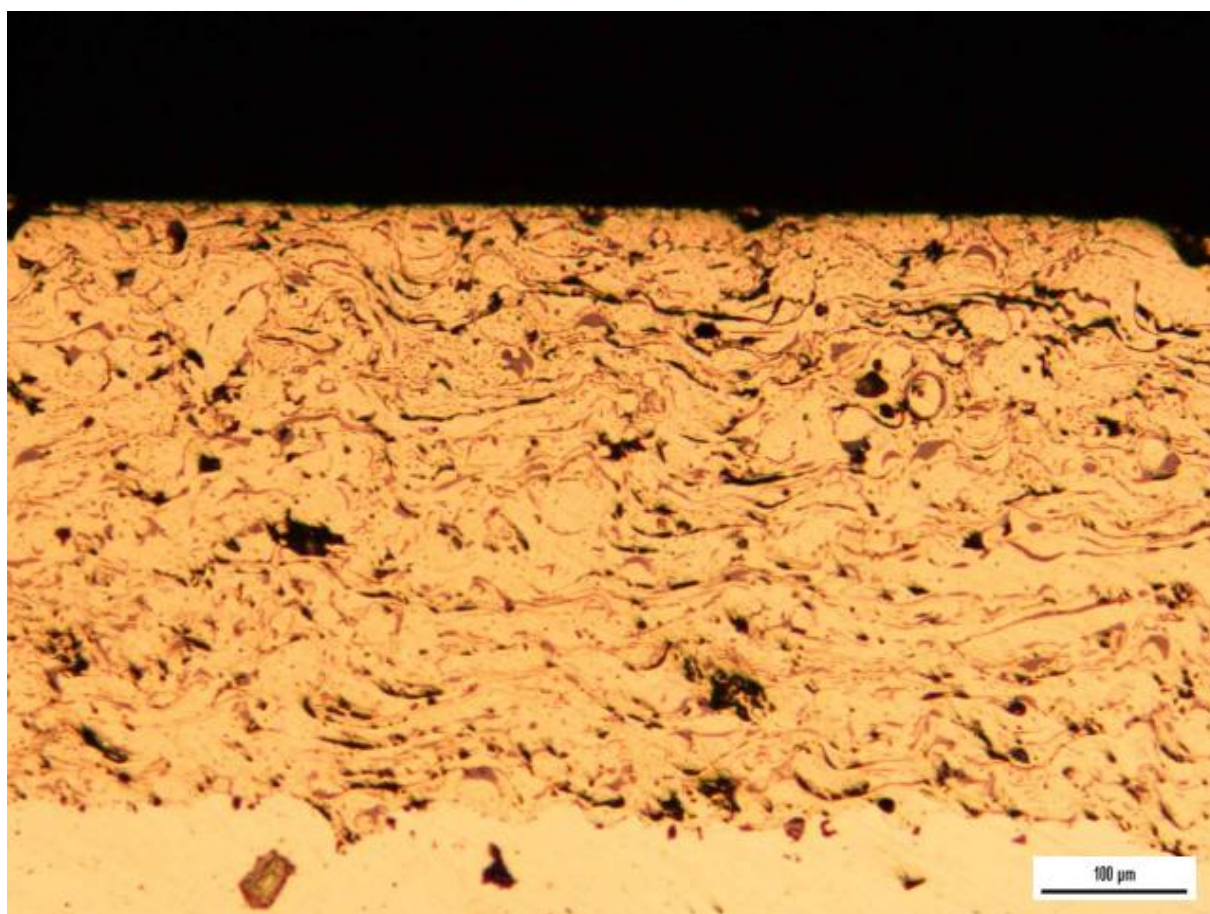
- popis póru, produktů oxidace a nenatavených částic;
- charakteristika zrn a textura povlaku;
- tloušťka povlaku;
- případné deformace a vady.[3]

Úprava vzorku a jeho pozorování bylo provedeno na přístrojích v laboratořích ČVUT v Praze na ústavu materiálového inženýrství na Karlově Náměstí. Vzorek byl upraven na metalografické pile Leco MSX255 a zalisován na lisu MTH Standard30. Broušení a leštění jsem provedl na brusce MTH Kompakt 1031. Metalografický výbrus jsem dále pozoroval na mikroskopu Neophth 32, který je vybavený CCD kamerou.

8.8. Vyhodnocení mikrostruktury povlaku

Mikrostruktura stříkaného žárového povlaku je lamelární, tvořená póry, oxidickými částicemi, nenatavenými částicemi nebo částečně natavenými částicemi.

Mikrostruktura hodnoceného povlaku je tvořena oxidickými částicemi, které jsou zobrazeny šedivým odstínem. Póry jsou zobrazeny černou. Nanesený povlak hodnotím jako dobře ukotvený na základním materiálu. Na rozhraní povlak – substrát nejsou viditelné žádné vady. Pozorovaný povlak je na Obr. 22.



Obr. 22 – NiTi mikrostruktura povlaku v řezu; tloušťka nanesené vrstvy 0,4 mm; zvětšeno 100x

Vizuální metodou jsem se pokusil stanovit procentuální poměr zastoupení pórů v zobrazené ploše povlaku, a to prostřednictvím prostého součtu černých plošek a odhadem jejich velikosti. Hodnotu pórovitosti odhaduji na 2,7 % z příčné plochy povlaku.

9. Závěr

Z důvodů neustále se zvyšujících nároků na mechanickou, chemickou a tepelnou odolnost strojních součástí, přičemž velký důraz je kladen zejména na zvýšení jejich životnosti se bude počet dílů z prvovýroby s naneseným žárovým nástřikem postupně zvyšovat. Při renovaci strojních součástí je využití žárového stříkání výhodné především díky nižší ekonomické náročnosti opravy, relativní dostupnosti užívané technologie a následnému zvýšení životnosti renovované strojní součásti.

Proces renovace kloubového spojení vozů trolejbusu Tr22, které je zkoumán v praktické části práce, je příkladem ekonomické výhodnosti a zlepšení užitných vlastností nanesením žárového nástřiku. Při dodržení správných postupů žárového nástřiku zmíněného renovovaného dílu, se na kritická místa nanese funkční povlak, který je následně odolný proti opotřebení, jež vzniká při provozu trolejbusu.

Metalografický výbrus první vrstvy naneseného materiálu, který jsem pozoroval na mikroskopu, je tloušťky 0,4 mm. Na díly kloubového spojení se nanáší jako první vrstva povlak z NiTi, na analyzovaném vzorku je stejný přídavný materiál. Povlak vykazuje ideální zakotvení na základním materiálu a žádné viditelné oxidické částice. Pórovitost povlaku jsem vizuální metodou stanovil na 2,7 % z příčné plochy naneseného nástřiku. Pórovitost má směrem od základního materiálu zkoumaného vzorku větší intenzitu, ale vzhledem k malé tloušťce povlaku není možné s určitostí tvrdit, že pórovitost naneseného povlaku NiTi přímo souvisí s tloušťkou povlaku.

Výhod, které žárové nástřiky přinášejí pro využití v dopravní technice či průmyslu obecně je nespočet. Proto předpokládám, že technologie žárových nástřiků bude mít větší zastoupení než dnes s tím, že o další rozšíření a možností aplikací se zaslouží zejména vývoj a výzkum přídavných materiálů a samotných zařízení pro nanášení povlaků.

10. Zdroje

- [1] DAVIS, J.R. *Handbook of Thermal Spray Technology*. 3rd ed. Ohio (USA): ASM International, 2009. ISBN 978-0-87170-795-6.
- [2] AMBROŽ, Oldřich a Jiří KAŠPAR. *Žárové nástřiky a jejich průmyslové využití*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1990. ISBN 80-030-0347-4.
- [3] Žárové nástřiky. Katedra materiálu a strojírenské metalurgie [online]. 2003 [cit.2016-08-01]. Dostupné z: http://www.kmm.zcu.cz/CD/content/8_4.html
- [4] VZÚ Plzeň: *Žárové Nástřiky* [online]. [cit. 2016-07-31]. Dostupné z: <https://www.vzuplzen.cz/zarove-nastriky/technologie.php>
- [5] KUBÍČEK, Jaroslav. *Renovace a Povrchové Úpravy* [online]. 2006. Brno [cit. 2016-08-05]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/opory_soubory/renovace_a_povrchove_upravy__kubicek.pdf
- [6] MATEJKA, Dušan a Bernard BENKO. *Plazmové Striekanie Kovových a Keramických Práškov*. Bratislava: Alfa nakladatelství technickej literatúry, 1988.
- [7] *Přídavné Materiály: Katalog Bohler Uddeholm*. 2015. Dostupné také z: http://www.bohler-uddeholm.cz/pridavne_materi
- [8] PREPARED BY AWS COMMITTEE ON THERMAL SPRAYING, UNDER THE DIRECTION OF AWS TECHNICAL ACTIVITIES COMMITTEE a APPROVED BY AWS BOARD OF DIRECTORS. *Thermal spraying: practice, theory, and application*. Miami, Fla: American Welding Society, 1985. ISBN 08-717-1246-6.
- [9] KREISLOVÁ, Kateřina a Markéta PARÁKOVÁ. *Měření tloušťky povlaků* [online]. [cit. 2016-07-31]. Dostupné z: <http://www.tribotechnika.sk/tribotechnika-42014/mereni-tloustky-povlaku-.html>
- [10] KUNEŠ, Josef, Zdeněk VESELÝ a Milan HONNER. *Tepelné bariéry*. Praha: Academia, 2003. ISBN 80-200-1218-4.
- [11] Prospekty a katalogy firem DTD Future Brno, Oerlicon Sulzer Metco, PLASMAMETAL, Amperit, Sandvik, Saint-Gobain, VW Group, Tatra Kopřivnice.