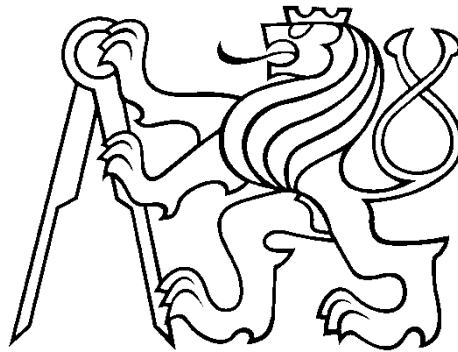


České vysoké učení technické v Praze
Czech technical university in Prague

Fakulta strojní
Faculty of mechanical engineering



Bakalářská práce
Bachelor thesis

Žárové nástřiky ve strojírenství
Thermal spray in mechanical engineering

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svoji bakalářskou práci vypracoval samostatně, s pomocí svého vedoucího bakalářské práce Ing. Petra Drašnara, Ph.D. a konzultanta Ing. Jana Kudláčka, Ph.D. Veškeré literární zdroje a informace, které jsem využil ve své bakalářské práci, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

V Praze dne

Lukáš Zahradníček

Poděkování

Ve své práci bych rád poděkoval svému vedoucímu bakalářské práce Ing. Petru Drašnarovi, Ph.D., za vedení a odbornou pomoc s vypracováním této bakalářské práce. Dále bych chtěl poděkovat Ing. Janu Kudláčkovi, Ph.D. za poskytnutí prostředků, nástrojů a přístrojů pro realizaci experimentální části mé bakalářské práce.

Jméno autora bakalářské práce:	Lukáš Zahradníček
Vedoucí práce:	Ing. Petr Drašnar, Ph.D.
Ústav:	12133 - Ústav strojírenské technologie
Zaměření:	Povrchové úpravy - žárové nástřiky
Název bakalářské práce:	Žárové nástřiky ve strojírenství
Rozsah bakalářské práce:	Počet stran: 54 Počet obrázků: 39 Počet grafů: 1 Počet tabulek: 7
Přílohy:	CD - Kompletní práce ve formátu *.pdf Technologický předpis ve formátu *.pdf Fotografie ve formátu *.jpg

Anotace

Teoretická část této bakalářské práce se zabývá rozбором problematiky žárových nástřiků, kde jsou uceleně popsány vlastnosti žárových nástřiků, jejich princip a struktura. Dále se práce věnuje porovnání vybraných metod metalizace a je popsán technologický postup vytváření žárového nástřiku. Experimentální část práce je věnována metodě žárového nástřiku elektrickým oblouku s různými přídavnými materiály, na které jsou dále nanášeny nátěrové hmoty. Je zde zkoumána přilnavost metalizovaného povlaku v závislosti na vybraných přídavných materiálech a to Zn, Al, a Zn/Al a s tím spojené měření tloušťky povlakovaného systému. V závěru práce jsou vyhodnoceny výsledky zkoušek a jejich technicko-ekonomické zhodnocení.

Klíčová slova:

- Žárový nástřik*
- Metalizace Zn, Al, Zn/Al*
- Předúprava*
- Přilnavost*

Annotation

The theoretical part of the Bachelor Thesis therein deals with problems relating to thermal spray coating and describes characteristic features of thermal spray coating, and their principles and structure in a complex way. In addition, this Thesis focuses on comparison of selected thermal spraying methods and description of the technological procedure to create such thermal spraying coating. The experimental part targets at thermal spraying method by electric arc with different additional materials which consequently painting materials are applied on. Particularly, sprayed coating adhesion depending on selected additional materials such as Zn, Al, and Zn/Al is examined together with measurement of coating system thickness. The test results and their technical and economical evaluation are assessed at the end of this Thesis.

Key Terms:

- Thermal spraying*
- Thermal spraying by Zn, Al, Zn/Al*
- Preliminary treatment*
- Adhesion*

Obsah

1	Úvod.....	9
2	Princip vytváření žárových nástřiků	10
3	Struktura žárového nástřiku	12
3.1	Oxidické vměstky.....	12
3.2	Pórovitost	13
4	Vlastnosti žárového nástřiku.....	14
4.1	Přilnavost.....	14
4.2	Tvrдост	15
5	Metody žárových nástřiků.....	15
5.1	Metody využívající tepelnou energii hoření směsi paliva a kyslíku	16
5.1.1	Nástřik plamenem	16
5.1.2	Detonační nástřik - D-Gun.....	19
5.1.3	Vysokorychlostní nástřik plamenem - HVOF	20
5.2	Metody využívající tepelnou energii elektrického zdroje.....	22
5.2.1	Plazmatický nástřik.....	22
5.2.2	Nástřik elektrickým obloukem.....	25
5.3	Moderní metody žárových nástřiků.....	28
5.3.1	Nástřik studeným plynem	28
5.3.2	Vysokofrekvenční indukční žárový nástřik	29
6	Porovnání jednotlivých metod žárových nástřiků.....	30
7	Technologický postup vytváření žárového nástřiku	32
7.1	Příprava povrchu základního materiálu pro nástřik	32
7.1.1	Vstupní kontrola	32
7.1.2	Čištění povrchu	32
7.1.3	Krytování strojních částí.....	33
7.1.4	Tryskání	33
7.2	Vlastní nástřik	34
8	Experimentální část.....	35
8.1	Příprava vzorků	35
8.1.1	Rozměry a značení vzorků.....	35

8.1.2	Předúprava povrchu	36
8.1.3	Vlastní nástřik	37
8.2	Technologické vlastnosti vrstvy	38
8.2.1	Odrhová zkouška	38
8.2.2	Měření tloušťky	41
8.2.3	Metalografické výbrusy	41
8.3	Vyhodnocení zkoušek	43
8.3.1	Vyhodnocení odtrhové zkoušky	43
8.3.2	Vyhodnocení tloušťky	45
8.3.3	Vyhodnocení metalografických výbrusů	46
9	Technicko ekonomické zhodnocení	48
10	Závěr	49
	Seznam použité literatury	50
	Seznam tabulek	52
	Seznam grafů	52
	Seznam obrázků	53

1 Úvod

V praxi se lze denně setkat s požadavky na zvýšení životnosti a spolehlivosti exponovaných součástí strojních zařízení, jejichž povrch nebo část povrchu je namáhána a degradována různými mechanizmy opotřebení vycházejícími z daných pracovních podmínek zařízení. Ve většině případů již nedostačují dosavadní klasické technologie a technologické postupy. Jednou z vhodných možností řešení je využití progresivní technologie žárového nástřiku.

Žárové nástřiky představují perspektivní technologii poskytující funkčně efektivní povlaky, o tloušťce od 50 μm do 3 mm, používané v mnoha odvětvích průmyslu. Tyto flexibilní, vysoce kvalitní a ekonomicky výhodné technologie umožňují optimálně přizpůsobit povrchové vlastnosti součásti náročným provozním podmínkám. [1]

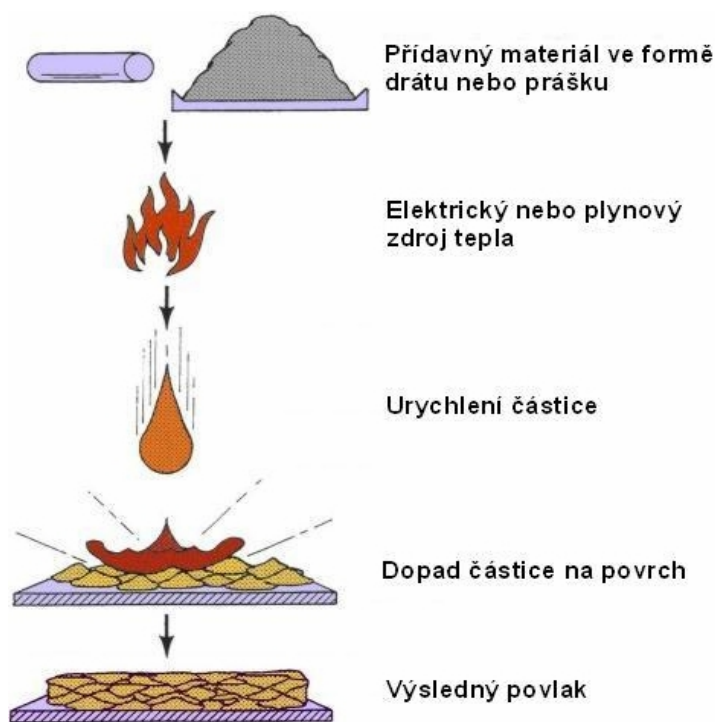
Technologii žárových nástřiků lze uplatnit jak v oblasti renovací, tak v oblasti prvovýroby. Optimálně provedeným žárovým nástřikem se významně prodlouží životnost a spolehlivost takto povrchově upravené součásti. V řadě případů - energetika, automobilový průmysl, letecký průmysl, chemický a petrochemický průmysl, lékařství - jsou technologie žárově stříkaných povlaků nezastupitelné a sehrávají klíčovou roli při výrobě. [1]

Teoretická část této bakalářské práce se věnuje rozboru problematiky žárových nástřiků ve strojírenství. Je zde představeno několik vybraných metod metalizace a jejich porovnání a dále příprava povrchu před nanesením žárového nástřiku. Praktická část se zaměřuje na metodu elektrického oblouku, která byla použita na přípravu vzorků. Poté proběhne odtrhová zkouška, proměření tloušťky a dále technicko ekonomické zhodnocení těchto výsledků.

2 Princip vytváření žárových nástřiků

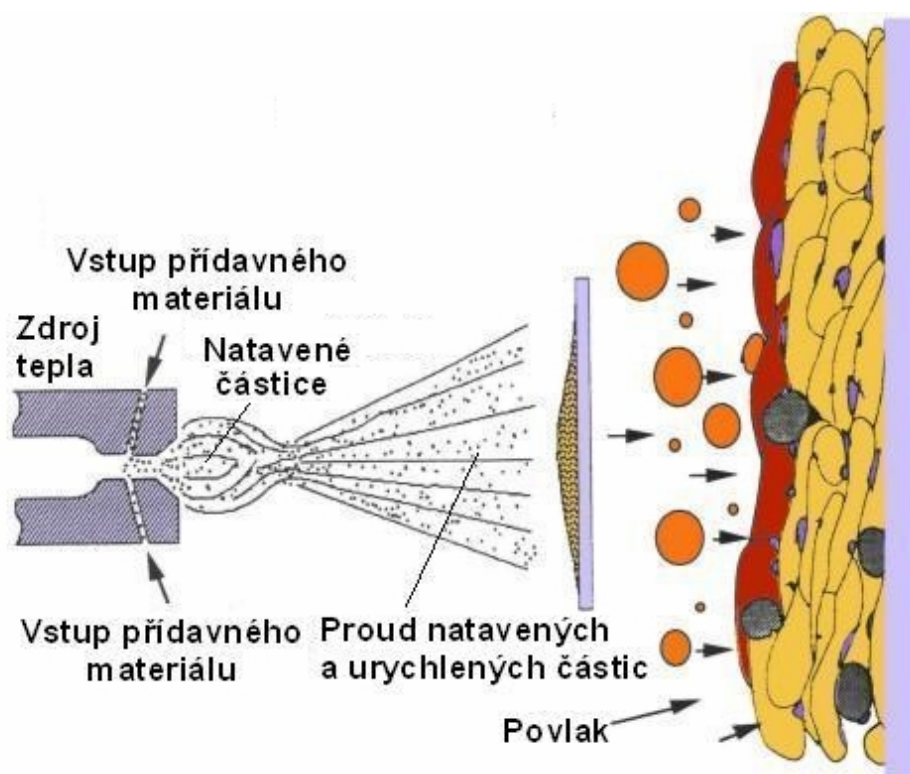
Princip vytváření žárových nástřiků spočívá ve vytvoření nové vrstvy na původním povrchu součásti, kdy se do zařízení přivede materiál, který bude nanášen buďto ve formě drátu nebo prášku (viz obr. č. 1). Jako polotovaru pro žárové stříkání se častěji používá drátu, který je dobře tvářitelný a má nižší teplotu tání. Přídavný materiál se v zařízení nataví a urychlí se proudem vzduchu nebo spalin přímo na základní povrch součásti. Po dopadu na povrch se urychlená částice rozptýlí po ploše a dojde k utužení a k mechanickému ukotvení. Povlak je tvořen typickou lamelární strukturou se speciálními vlastnostmi (viz obr. č. 2). [1]

Zdroj energie, který je nutný k natavení stříkaného kovu se používá buďto plynového zdroje tepla nebo elektrická energie. Nejčastěji se používá nástřik pomocí kyslíko - acetylenového plamene nebo elektrického oblouku, kdežto méně časté jsou pak plazmové technologie, které se využívají převážně na keramické a kovokeramické povlaky, neboť vysoká teplota plazmatu umožňuje roztavit látky s vysokou teplotou tání. [1]



Obr. 1: Podstata žárového nástřiku [2]

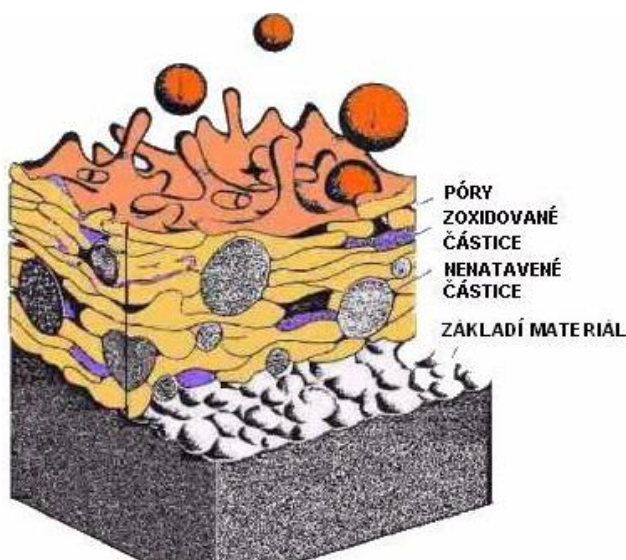
Žárové nástřiky lze nanášet na téměř všechny typy základních materiálů, přesto se povlaky mohou vytvářet pouze z těch materiálů, u kterých nedochází k rozpadu pod bodem tání. Kvalita žárových nástřiků závisí především na spojení mezi oběma vrstvami materiálů, proto je zapotřebí, aby se částice roztaveného kovu povlaku mechanicky zakotvily na povrchu základního materiálu. Za nejdůležitější proces před samotným vytvořením žárového povlaku lze považovat kvalitní přípravu povrchu, poté následuje vlastní žárový nástřik a následná úprava a ošetření nastříkané vrstvy. Povrch součásti musí být před žárovým stříkáním zbaven všech mastnot a nečistot a musí být zdrsněn. To se provádí buďto chemicky nebo mechanicky a 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. [1], [3]



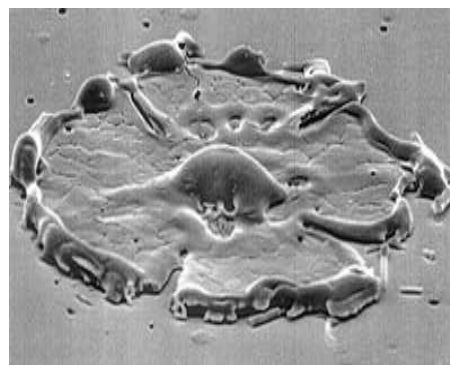
Obr. 2: Schéma procesu vytváření žárového nástřiku [2]

3 Struktura žárového nástřiku

Povlaky, které jsou vytvořené jakoukoliv technologií žárového nástřiku, jsou tvořeny lamelární strukturou, která je složena z jednotlivých deformovaných, nenatavených a částečně natavených částic, oxidických částic z pórů (viz obr. č. 3). Deformovaná natavená částice tzv. splat (viz obr. č. 4) tvoří většinu povlaku. Ideální splat má tvar disku. 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. [1], [4]



Obr. 3: Schéma struktury žárového nástřiku [2]



Obr. 4: Splat [4]

3.1 Oxidické vměstky

Obsah oxidů ve struktuře je jedním z hlavních faktorů ovlivňující výsledné vlastnosti povlaku. V příčném výbrusu je lze poznat tak, že mají podlouhlé tmavé tvary. Oxidické vměstky ve struktuře kovového povlaku zvyšují tvrdost vrstev. Avšak jejich nadměrné množství může způsobit zvýšení křehkosti povlaku. Pokud se budou oxidy hromadit pouze na jednom místě, může docházet ke snížení soudržnosti povlaku. [1]

Ve struktuře vznikají oxidické částice dvěma následujícími způsoby:

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

3.2 Pórovitost

Porozita má stejně jako obsah oxidických vměstků ve struktuře kovového povlaku značný podíl na výsledné vlastnosti žárově stříkaných povlaků. Obecně je známo, že 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. [1]

Pórovitost se ve struktuře nejčastěji objevuje přítomností nenatavených, nebo špatně natavených částic. 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 sploty, neboť nejsou v těsném kontaktu. [1]

Míru pórovitosti ve struktuře povlaku lze eliminovat následujícími způsoby:

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

4 Vlastnosti žárového nástřiku

Vlastnosti povlaků vytvořených žárovými nástřiky mají vliv na jeho chování při různých provozních podmínkách. Vlastnosti vrstev lze ovlivnit přídavným materiálem, vhodným nastavením procesních parametrů, obsahem oxidických vměstků a pórovitostí ve struktuře, kvalitou přilnavosti, soudržnosti splatů, atd. Různými technologiemi vytváření žárových nástřiků lze získat povlaky s odlišnými mechanickými parametry. Proto je důležitá při volbě technologie a přídavného materiálu znalost mechanických vlastností žárových nástřiků. [1]

Mezi vlastnosti, kterými jsou žárové nástřiky nejčastěji posuzovány, patří:

- pevnost povlaku,
- tepelné vlastnosti,
- odolnost proti korozi a oxidaci,
- obrobitelnost,
- přilnavost povlaku k substrátu (adheze),
- elektrické vlastnosti,
- tvrdost,
- magneto - optické vlastnosti. [1]

4.1 Přilnavost

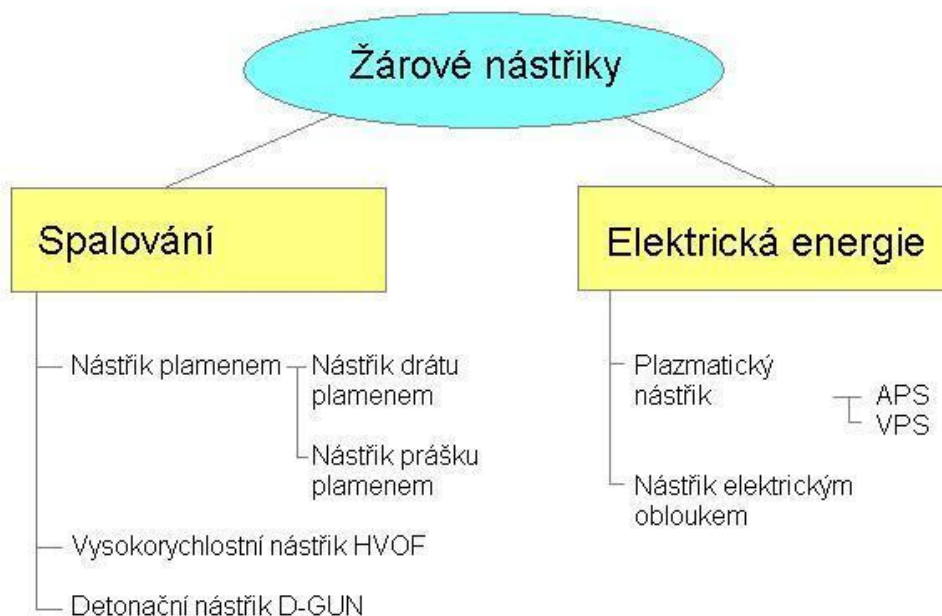
Přilnavost vrstvy k základnímu materiálu je jednou z vlastností, která má největší vliv na kvalitu vytvořeného povlaku. Soudržnost deformovaných natavených částic i přilnavost vrstvy k základnímu materiálu je nejvíce ovlivněna mechanickým zakotvením dopadajících částic na povrch základního materiálu. Dále je pak ovlivněna meziatomovými vazbami, tzn. chemickou vazbou a Van der Waalsovou 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 rozzhavené 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.[1], [5]

4.2 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 vtylačování 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. [2], [5]

5 Metody žárových nástřiků

Metody žárových nástřiků lze rozdělit do dvou základních skupin a to podle použitého tepelného zdroje natavení přídavného materiálu (viz obr. č. 5). Tepelná energie se tedy získává buďto z hoření směsi paliva a kyslíku nebo z elektrického zdroje.



Obr. 5: Rozdělení žárových nástřiků [2]

5.1 Metody využívající tepelnou energii hoření směsi paliva a kyslíku

- Nástřík plamenem
- Detonační nástřík - (D-Gun)
- Vysokorychlostní nástřík plamenem - HVOF

5.1.1 Nástřík plamenem

Žárový nástřík plamenem (viz obr. č. 6) patří mezi nejstarší metody žárového nástříku. Nástřík plamenem využívá stlačeného vzduchu nebo kyslíku společně s palivem (propylen, acetylen, propan, vodík). Nanášený materiál ve formě drátu nebo prášku je přiváděn do plamene, vzniklého hořením této směsi, kde dochází k jeho natavení a urychlení směrem k povlakované součásti. [1], [3]

Výstupní rychlost plamene a jeho výstupní energie neumožňují urychlení částic nanášeného materiálu na takové hodnoty, které by zaručovaly dobré vlastnosti nanesených povlaků, především však jejich přilnavost, a proto bývá pro urychlování částic přídavného materiálu používán suchý a čistý stlačený vzduch nejčastěji pod tlakem 0,6 MPa. [1], [3]

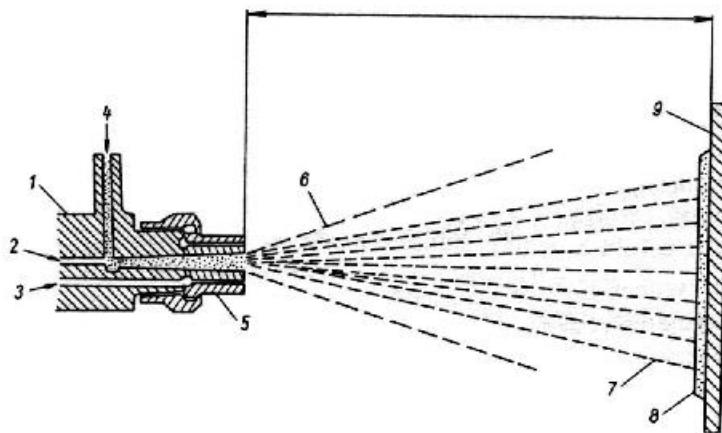


Obr. 6: Žárový nástřík plamenem

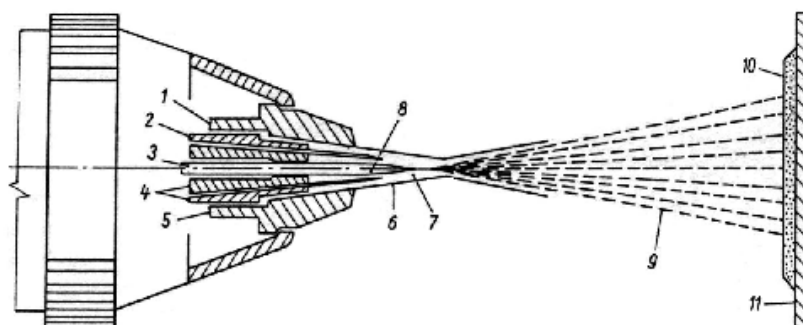
Nástřik plamenem se řadí mezi méně kvalitní povlaky a proto se tato metoda nevyužívá pro aplikace, kde je zapotřebí povlak s vysokou hustotou a přilnavostí. Mezi hlavní důvody těchto nedostatků patří nízká teplota plamene a nízká dopadová rychlost částic. Přesto je tato metoda favoritem pro méně náročné aplikace a to především díky nízkým pořizovacím i provozním nákladům. [1], [3]

Pro žárový nástřik plamenem se aplikují přídavné materiály ve výchozím stavu práškovém (viz obr. č. 7) nebo častěji ve formě drátu (viz obr. č. 8). Jsou známy také aplikace přídavných materiálů na keramické bázi, které jsou dodávány a používány ve tvaru tyčinek nebo plněných ohebných trubiček z plastů. U práškových přídavných materiálů činí velikost částic ve výchozím stavu obvykle 60 až 120 μm , u přídavných materiálů ve formě drátu se používají nejčastěji průměry drátu 2 mm, 2,5 mm a 3,15 mm. [1], [2], [3]

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. 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. [1],[2]



Obr. 7: Schéma žárového nástřiku plamenem - přídavný materiál prášek [2] 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



Obr. 8: Schéma žárového nástřiku plamenem - přídavný materiál drát [2] 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

Parametry nástřiku

Teplota plamene bez ochranného plynu dosahuje 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⁻¹. 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. [1], [2], [3]

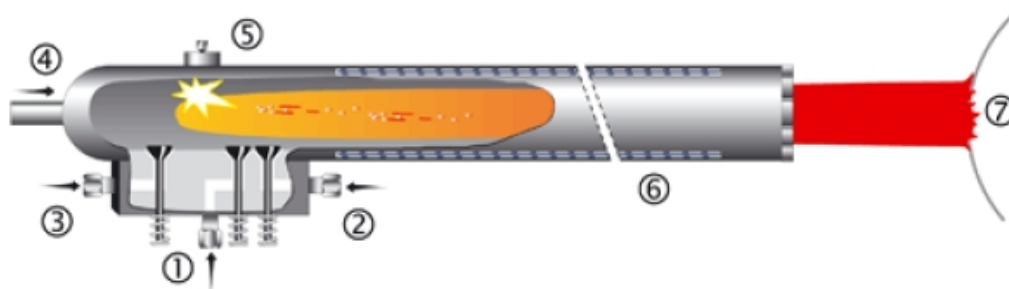
Hlavní parametry ovlivňující vlastnosti povrchu jsou následující:

- množství hořlavého plynu
- množství kyslíku
- vzdálenost nástřiku
- tlak rozstřikovacího vzduchu
- množství nanášeného přídavného materiálu
- tvar a velikost přídavných materiálů [1], [3]

5.1.2 Detonační nástřík - D-Gun

Tento žárový nástřík využívá tepelné a kinetické energie spalovacího procesu plynů, uzavřených ve spalovací komoře, do které je přiváděn materiál ve formě prášku. V porovnání s nástříkem plamenem dosahuje vyšších teplot a i rychlostí dopadu. [1], [6]

Při nástříku jsou palivové plyny stlačovány ve spalovací komoře, do které je přiváděn materiál ve formě prášku. Vzniklá směs plynů a prášku je diskontinuálně zapalována zapalovací svíčkou. Vzniklá exploze plynů ohřívá a současně urychluje částice prášku hrdlem hořáku směrem k povlakované součásti. Poté je komora vypláchnuta proudem dusíku (viz obr. č. 9). Tento proces je cyklicky opakován a to s frekvencí více jak 100 cyklů za minutu. [3], [6]



Obr. 9: Schéma žárového nástříku detonační vlnou [6] 1 - přívod acetylenu, 2 - přívod kyslíku, 3 - přívod dusíku, 4 - přívod přidávaného materiálu - prášku, 5 - zapalovací svíčka, 6 - hlavěň, 7 - základní materiál, podložka

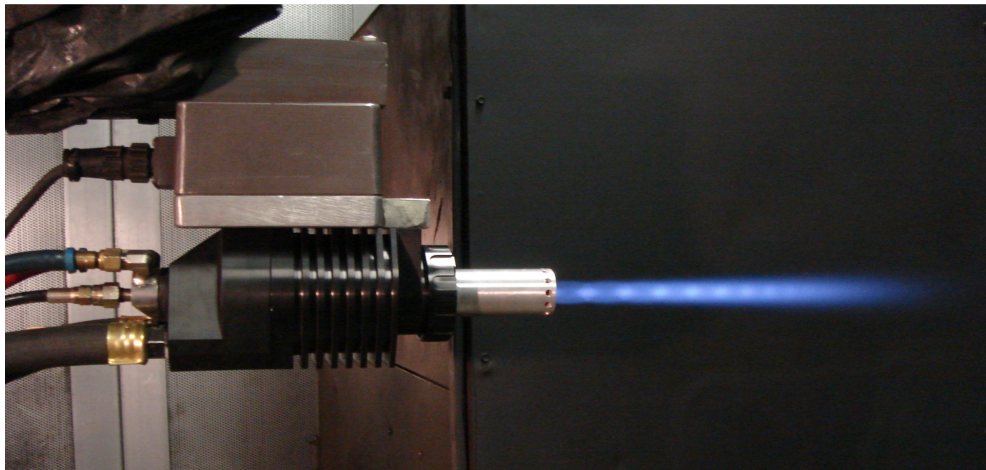
Skladba materiálů, vhodných pro detonační nástřík je obdobná jako pro HVOF nástřík, touto metodou lze nanášet všechny typy přidávaných materiálů vhodné práškové formy a vhodné velikosti částic, především však s výhodou materiály s vysokou teplotou tavení, materiály speciální a především ty, které nelze nanášet jinou, ekonomicky výhodnější metodou žárového nástříku. Nejčastěji se jedná o kovy a jejich slitiny nebo některé druhy cermetů. [1], [6]

Vyšší dosažená teplota a rychlost částic, spolu s redukcí oxidační atmosféry v uzavřené spalovací komoře, vede ve srovnání s nástříkem plamenem k lepší adhezi povlaku, k výraznějšímu rozprostření částic, snížení porézity a obsahu oxidických částic ve struktuře. Rychlost plamene bývá vyšší než $1000 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ a jeho teplota dosahuje hodnot od 4000°C do 6000°C . Nejběžněji je pro detonační nástřík používána směs plynů acetylenu s kyslíkem. Hustota povlaku vytvořeného detonačním nástříkem bývá vyšší než 95% a hodnota přilnavosti (adheze) je až 82 MPa. Během nástříku dochází též

k menší míře dekarbonizace materiálu povlaku, což má za následek jeho vysokou tvrdost. [1]

5.1.3 Vysokorychlostní nástřik plamenem - HVOF

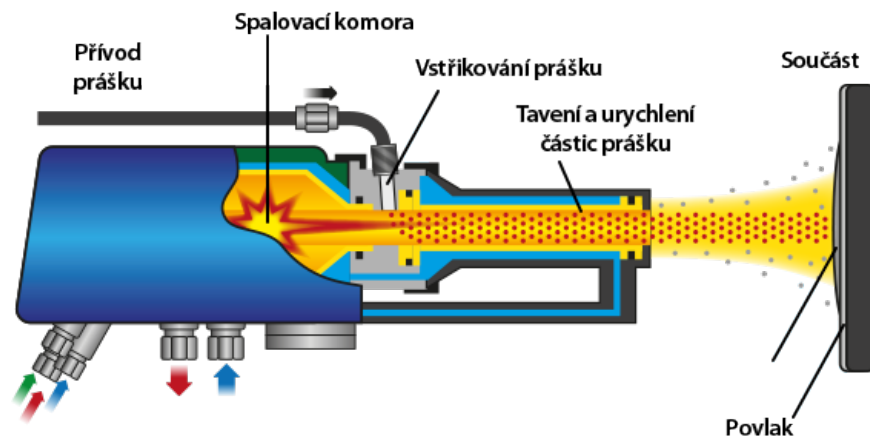
Označení HVOF je převzato s anglického jazyka a znamená: H-high (výška), V-velocity (rychlost), O-oxygen (kyslík), F-fuel (palivo), což je již v názvu zmíněný vysokorychlostní nástřik plamenem (viz obr. č. 10). Tato metoda žárového nástřiku je velmi blízká metodě detonačního nástřiku, liší se pouze v plnění spalovací komory. U vysokorychlostního nástřiku je spalovací komora plněna kontinuálně a stejně tak 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) přídatný materiál v práškové formě, kde 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.[1], [3]



Obr. 10: Vysokorychlostní nástřik plamenem - HVOF

Technologie vysokorychlostního nástřiku plamenem není vhodná pro nástřik keramických povlaků. S ohledem na plazmatický nástřik je teplota plamene poměrně nízká. Prášek se v průběhu letu dostatečně nenataví a díky tomu nedojde ani k řádnému rozložení částic na povrchu součástí. 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 povlaku. Tlakové pnutí je výhodné i z hlediska únavy povlakovaných materiálů. [1], [3]



Obr. 11: Schéma principu vysokorychlostního nástřiku plamene - HVOF [12]

Parametry nástřiku

U vysokorychlostního nástřiku se pohybuje rychlost plamene mezi 500 až 1200 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$. Rychlost roztavených částic dopadajících na povrch je od 200 do 1000 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$. Podle složení hořlavé směsi a podmínek hoření dosahuje teplota hořících plynů od 3000 do 5000°C, což jsou podobné hodnoty jako u detonačního nástřiku. [1], [3]

V zařízení pro vysokorychlostní nástřik plamenem jsou používány následující plyny:

- hořlavý plyn - kerosin, propylene, propan, acetylene, vodík
- kyslík
- dusík - dopravní plyn přídavného materiálu
- vodík - řídicí plyn plamene

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 na bázi karbidů wolframu, chromu a titanu. Povlaky vytvořené vysokorychlostním nástřikem jsou odolné proti opotřebení a korozi v různých prostředích.

Povlaky vyrobené technologií HVOF jsou svojí strukturou a vlastnostmi srovnatelné s povlaky vytvořenými pomocí technologie detonačního nástřiku. Hustota těchto povlaků, jejich adheze k základním materiálům a obsah oxidů ve struktuře často převyšuje kvalitu povlaků vytvořených pomocí plazmatického nástřiku. HVOF povlaky

mohou v některých případech dosahovat adhezní pevnosti více jak 83 MPa a hustota povlaku představuje až 98% hustoty objemového materiálu.

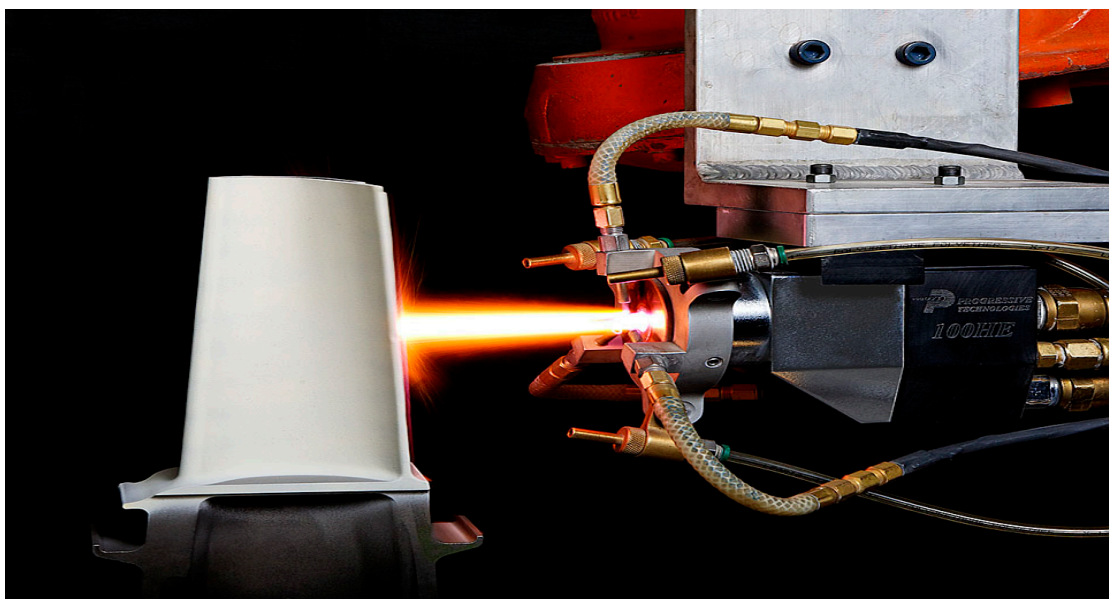
Jednou z nevýhod této metody je obecně náročný provoz. Jedná se především o složitost technologického vybavení nebo o hlučnost během procesu vytváření vrstev. Při provozu je dosahováno hodnot přes 100 dB při frekvenci 8000 Hz. [1], [2], [3]

5.2 Metody využívající tepelnou energii elektrického zdroje

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

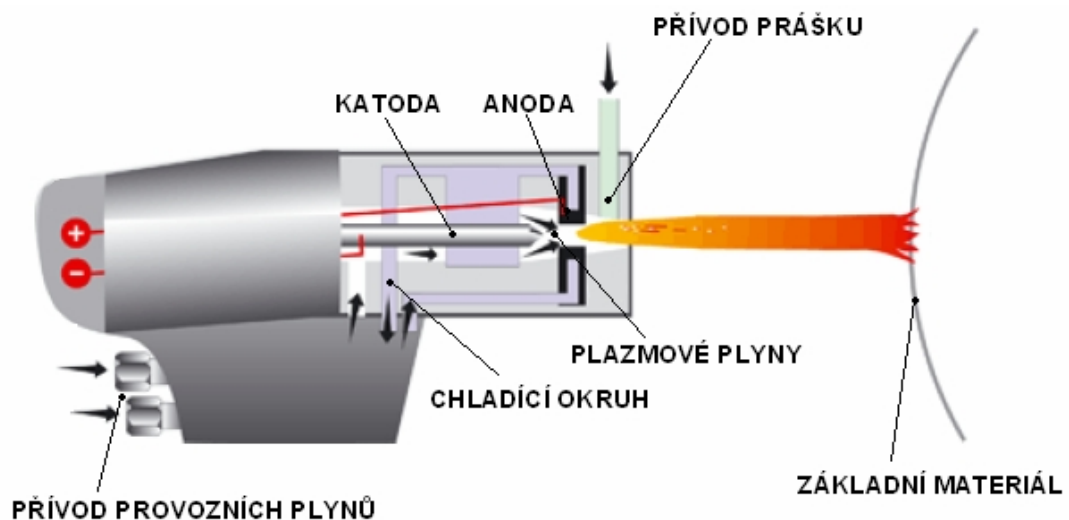
5.2.1 Plazmatický nástřik

Při plazmatickém nástřiku (viz obr. č. 12) hoří elektrický oblouk mezi vodou chlazenou wolframovou katodou a válcovou měděnou anodou, tvořící zároveň trysku plazmového hořáku. Elektrický oblouk hoří v plazmovém plynu (obvykle argon nebo jiný inertní plyn). Plazmový plyn je napouštěn axiálně do hořáku, na jehož druhém konci vystupuje plazma s vysokou teplotou (až 20 000 K) a entalpií. Do něj se pomocí nosného plynu přivádí nanášený materiál ve formě prášku (viz obr. č. 13). [1], [3]



Obr. 12: Plazmatický nástřik

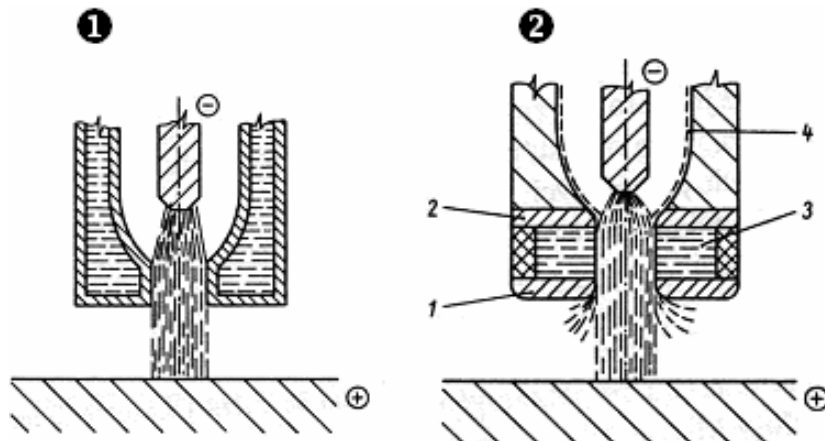
Touto metodou je možné díky vysoké teplotě plazmatu nanášet všechny druhy materiálů od čistých kovů až po těžce tavitelné materiály (např. keramiky). Vysoká teplota plazmatu je v některých případech nevýhodou, protože může způsobit oxidaci, změnu fázového složení nebo vyhořívání některých prvků nanášeného materiálu v průběhu nástřiku. Vlastnosti takto vytvořeného povlaku se poté mohou výrazně lišit od předpokládaných. Pro dosažení extrémně vysoké hustoty, přilnavosti a čistoty povlaků je možné provádět plazmatický nástřik v uzavřené komoře za sníženého tlaku (obvykle 0,005-0,02 MPa), tzv. plazmatický nástřik ve vakuu. [1], [3]



Obr. 13: Schéma principu plazmatického nástřiku [6]

Konstrukce zařízení pro plazmatický nástřik se vzájemně liší tvarem a velikostí elektrody, materiály zařízení či způsobem chlazení. Různé konstrukce plazmových hořáků umožňují jak dosahovat různých rozsahů průtoku plynů a množství vnesené energie, tak i používat různé typy vstupu přídavného prášku do plazmového hořáku. Podmínky a geometrie vstupu prášku mají výrazný vliv na stupeň jeho protavení a tudíž i na kvalitu výsledného povlaku - hlavně na míru porezity a obsah oxidů ve struktuře nástřiku. V praxi se také používají dva principy stabilizace plazmového oblouku (viz obr. č. 14): [6]

- s plynovou stabilizací plazmového oblouku
- s kapalinovou stabilizací plazmového oblouku



Obr. 14: 1 - princip plynové stabilizace, 2 - princip kapalinové stabilizace [6] 1, 2 - měděná tryska, 3 - stabilizační komora, 4 - elektrodová komora

Oba principy stabilizace mají svá opodstatnění a využití, ale v praxi jsou více rozšířeny plazmové hořáky s plynovou stabilizací. [6]

Díky vysoké teplotě plazmatu lze použít tuto technologii pro nástřik prakticky všech materiálů, které jsou stabilní až do teploty tavení. Tato metoda je především vhodná pro nástřik kovů, většiny keramik a cermetů. Vysoká teplota však může být v některých případech (např. u cermetů) nevýhodou, protože může způsobit oxidaci, změnu fázového složení nebo vyhořívání některých prvků nanášeného materiálu v průběhu nástřiku. [1], [3]

Vzhledem k větší složitosti zařízení i celého technologického procesu žárového nástřiku plazmou je zde i větší počet technologických parametrů, jejichž změnou lze ovlivňovat vlastnosti nanášených vrstev. Zaměřením se pouze na technologické parametry vlastního procesu nanášení, lze uvést tyto technologické parametry: [6]

- velikost plazmového proudu
- velikost napětí plazmového paprsku
- množství plazmového plynu
- množství dopravního plynu
- množství nanášeného přídavného materiálu
- vzdálenost nástřiku

Metoda žárového nástřiku plazmovým paprskem vyžaduje náročné a složité technologické zařízení. K nevýhodám lze přiřadit některé škodlivé faktory provozu, které nepříznivě působí na lidský organismus (světelné a ultrafialové záření a vysoká

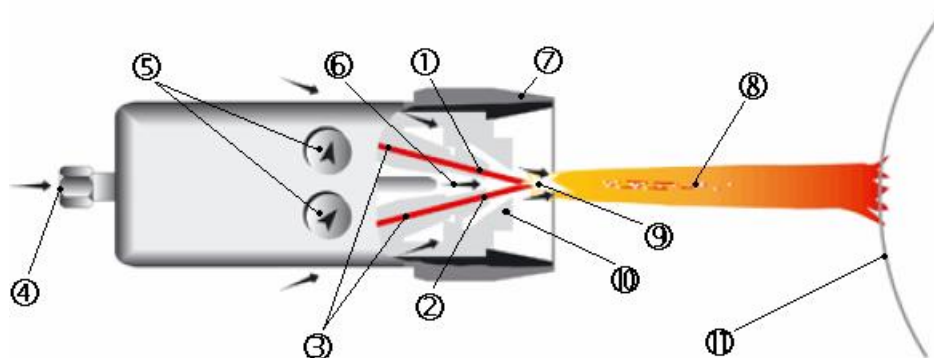
hladina hluku), což vyžaduje speciální úpravu pracoviště nebo speciální stříkací kabinu. [6]

5.2.2 Nástřik elektrickým obloukem

Princip metody žárového nástřiku elektrickým obloukem (viz obr. č. 15) spočívá v roztavení přídavného materiálu, který je v podobě dvou drátů přiváděn do stříkací hubice. Přídavné materiály musí být vodivé, mohou být jak stejného tak i rozdílného složení. Ve stříkací hubici jsou dva dráty vedeny směrem k sobě (viz obr. č. 16). Mezi konci drátů hoří elektrický oblouk, který přídavný materiál natavuje. 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. [1]



Obr. 15: Nástřik elektrickým obloukem [15]



Obr. 16: Schéma principu nástřiku elektrickým obloukem [6] 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⁻¹. 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. [1], [6]

Vlastnosti nanášených vrstev lze ovlivňovat těmito technologickými parametry:

- velikost stříkacího proudu
- velikost 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, mědiči nerezové oceli. Pro další zvýšení korozivzdornosti se povrchové póry zatěsňují impregnačním nátěrem na bázi epoxidových pryskyřic. [1], [2]

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 způsobeno tím, že je přídavný materiál rozprašován studeným proudem plynu.[2]

U technologie žárového nástřiku elektrickým obloukem jsou splatly 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 porézity je způsobena nerovnoměrnou velikostí částic. V porovnání s jinými druhy žárových nástřiků jsou nanášené vrstvy ovlivněny pouze teplem dopadajících kapiček kovu na substrát. [2], [3]

Typické přídavné materiály:

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

Hlavní aplikace:

- odolnost proti opotřebení
- odolnost proti korozi
- doplnění rozměrů

Výhody metody elektrickým obloukem

- jednoduchost
- nízké provozní náklady
- mobilita
- vysoký výkon (až 80 kg materiálu za hodinu)
- široké spektrum materiálů dostupných ve formě drátu
- jednoduchý nástřik velkých ploch (ruční stříkání)

Nevýhody metody elektrickým obloukem

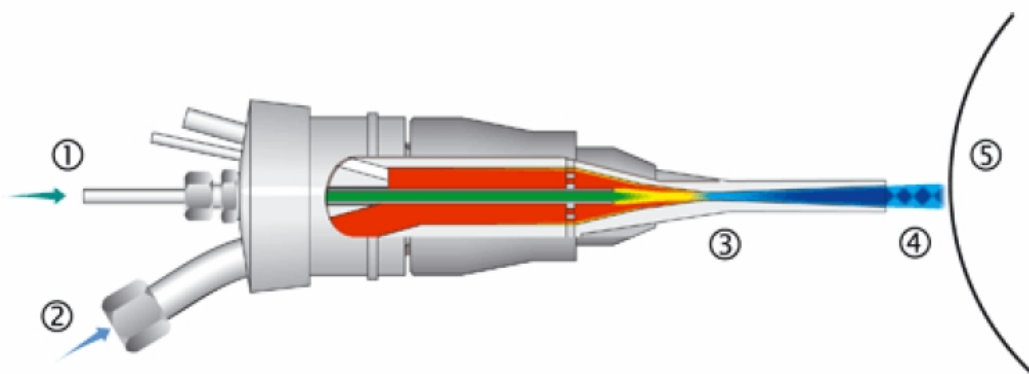
- vyšší pórovitost v nástřikové vrstvě (cca 20%)
- přídavný materiál musí být elektricky vodivý
- nižší soudržnost se základním materiálem (lze omezit použitím tzv. mezivrstvy)

5.3 Moderní metody žárových nástřiků

Vedle uvedených základních metod žárových nástřiků jsou používány v omezené míře i další moderní metody. Jsou to takové metody, které byly vyvinuté s cílem dosažení vyšších parametrů při nanášení povlaků, jako jsou především vyšší rychlosti nanášených částic. [6]

5.3.1 Nástřik studeným plynem

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 (viz obr. č. 17), tedy proud hnacího plynu dosahuje nadzvukových rychlostí a částice dopadající na povrch základního materiálu dosahují rychlostí od 900 do $1200\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. [7], [8]



Obr. 17: Schéma stříkací pistole pro nástřik studeným plynem [6] 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 ($>100\text{MPa}$). [7]

Díky parametrům této technologie nedochází během aplikačního procesu ke vzniku oxidů ve struktuře povlaku. Mezi další výhody patří tepelně neovlivněná mikrostruktura nanášeného přídavného materiálu i povlakované součásti, je

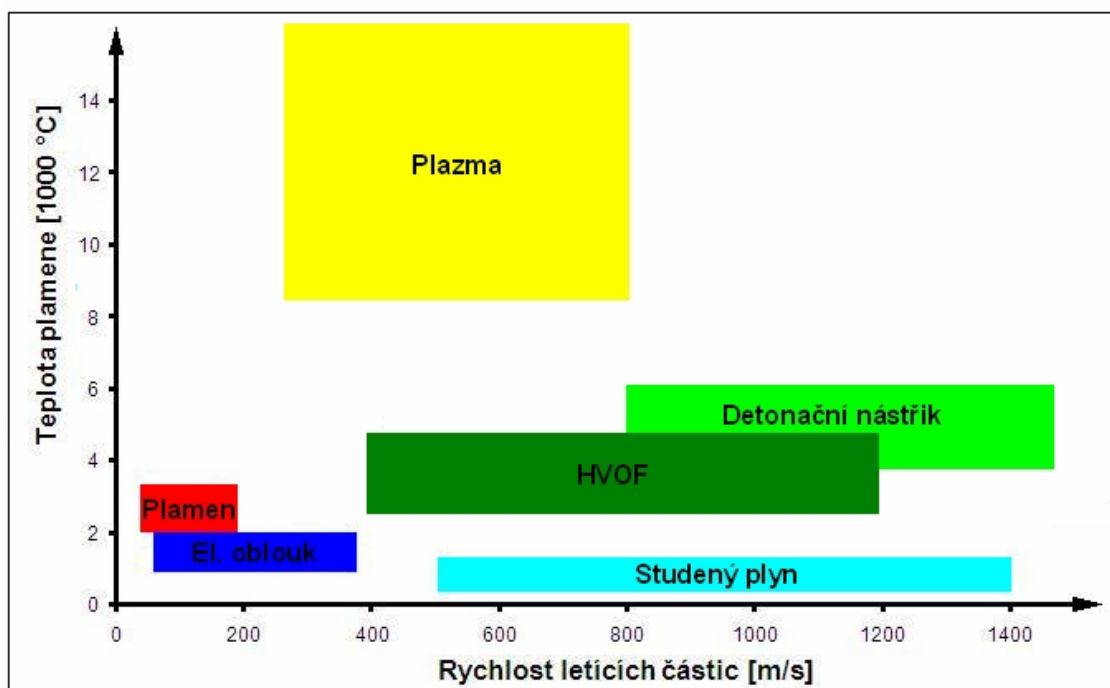
eliminováno vnitřní napětí vznikající během chladnutí, není potřeba doba na chladnutí během aplikace nástřiku, lze nanášet povlaky větší tloušťky, menší nároky na krytování povlakované součásti. Naopak mezi nevýhody nástřiku studeným plynem patří vysoký průtok a tím i spotřeba aplikačního plynu, tvrdé a křehké materiály (např. keramika) lze stříkat jen omezeně v kombinaci s měkkým materiálem jako pojivem, nástřik studeným plynem nelze aplikovat na některé typy základního materiálu, tato metoda je zatím ve fázi výzkumu a vývoje, proto nejsou známy všechny výhody a nevýhody této technologie. [6]

5.3.2 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 využívá stlačeného vzduchu nebo inertních plynů (Helium, Neon, Argon). Nanášené částice mají velikost od 20 do 120 μm , záleží na tlaku rozstříkujícího plynu. [3]

6 Porovnání jednotlivých metod žárových nástřiků

Z popisu jednotlivých metod žárového nástřiku a z jejich fyzikálních parametrů již částečně vyplynuly rozdíly, přednosti a nedostatky jednotlivých technologií žárového nástřiku. Znalost této problematiky nám umožňuje zvolit vhodnou metodu žárového nástřiku pro jednotlivé aplikace. Výrazně se tím zvyšuje efektivita a zlepšuje ekonomické hledisko povrchových úprav metodou žárového stříkání. Je nutné také zmínit, že stálým vývojem a zdokonalováním jednotlivých metod se nejen rozšiřují jejich aplikační možnosti, ale i optimalizují vlastnosti již známých aplikací. V tab. č. 1 je přehled parametrů jednotlivých metod žárového nástřiku, některé vlastnosti povlaků vytvořených těmito metodami a jejich nejběžnější aplikace. [1]



Obr. 18: Porovnání procesů žárového nástřiku z hlediska teploty a rychlosti dopadajících částic [6]

Tab.1: Porovnání jednotlivých metod žárových nástřiků [6]

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

7 Technologický postup vytváření žárového nástřiku

Aby povlaky vytvořené technologií žárových nástřiků vykazovaly vlastnosti, které jsou odpovídající provozním podmínkám jejich používání, je důležité dodržet určité postupy a zásady, které mohou v podstatné míře ovlivňovat kvalitu a tím i provozuschopnost výsledných nástřiků. [1]

7.1 Příprava povrchu základního materiálu pro nástřik

Před samotným nanesením přídavného materiálu musí být provedena příprava povrchu základního materiálu. Povrch součásti musí být zbaven nečistot (odmaštěním, mořením) a musí být také zdrsňen (tryskání). Tato aplikace je velmi důležitým prvkem a vhodně upravený povrch povlakované součásti před metalizací výrazně ovlivňuje kvalitu spojení mezi povlakem a základním materiálem. [1], [3]

7.1.1 Vstupní kontrola

Vstupní kontrola má za úkol kontrolu povrchu a rozměrů povlakované součásti. Dále se při kontrole povrchu zjišťují možné výskyty trhlin, prasklin a jiných defektů povrchu. Kontrola rozměrů spočívá v porovnání skutečných rozměrů s rozměry, které udává výkres. Další možná kontrola je kontrola geometrie součásti (kontrola kuželovitosti, válcovitosti a jiných odchylek od požadovaných rozměrů). [1]

7.1.2 Čištění povrchu

Pokud je povrch povlakované součásti mastný, vede to ke špatné adhezi natavených částic k základnímu materiálu. Proto je důležité zbavit povrch součásti od všech nečistot. Odmašťováním lze odstranit všechny druhy nečistot z povrchu povlakované součásti, které jsou k povrchu vázány adhezními silami (prach, kovové třísky) nebo fyzikální absorpcí (látky tuhého 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. [9]

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.[9]

7.1.3 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. [1]

7.1.4 Tryskání

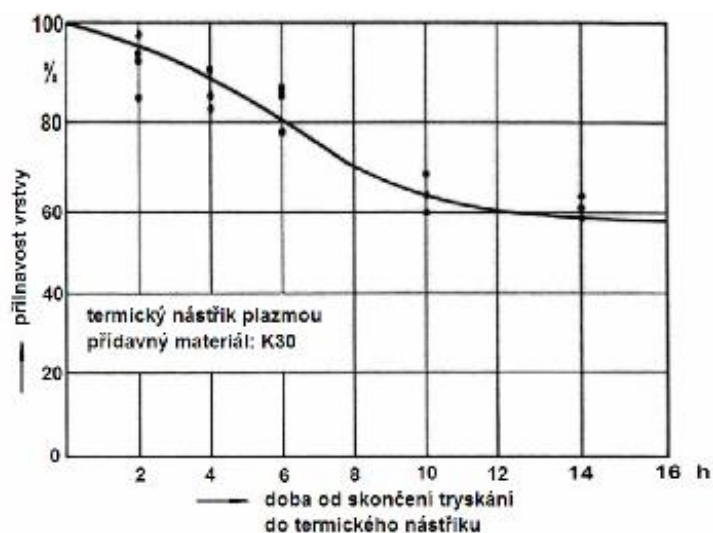
Tryskání je technologický postup opracování povrchu, při kterém se povrch základního materiálu očišťuje od korozních produktů, grafitu, písku atd. Dalším účelem tryskání je dodat povrchu vhodnou drsnost a zpevnění. Tryskáním se upravují většinou tvrdé materiály. Abrazivní částice dopadají na povrch základního materiálu velkou rychlostí a způsobují tak zdrsnění povrchu. [9]

Jako tryskací media se nejčastěji využívají:

- litinová drť a broky - použití do tlaku 0,7 MPa, dobrá úběrová schopnost, dražší
- křemičitý písek - použití do tlaku 0,3 MPa, malá úběrová schopnost, levnější
- karbid křemíku, korund - ostřejší zrno [9]

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). [9]

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. [3]



Graf 1: Snižování přilnavosti povlaků v důsledku oxidace povrchu podložky [3]

7.2 Vlastní nástřik

Po dokončení operací zmíněných v kapitolách 7.1.1.až 7.1.4. nastává samotný proces žárového nástřiku vhodně zvolenou technologií. Žárové nástřiky smí provádět pouze osoby, které jsou odborně vyškolené a přezkoušené 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 přehřívána 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. [1], [3]

8 Experimentální část

Tato experimentální část bakalářské práce se zaměřuje na metodu žárového nástřiku elektrickým obloukem, kde jako přídavného materiálu bylo použito hliníku (Al), zinku (Zn) a zinacoru (Zn/Al v poměru 85%/15%). Tento žárový nástřik byl proveden ve firmě *S.A.F. Praha*, kde proběhlo i následné nanesení nátěru *Penguard Express Mio* a dále elastického polyuretanového vrchního nátěru *Normadur 65 HS*. Bylo vytvořeno 17 vzorků, na kterých byla následně v laboratořích Ústavu strojírenské technologie FS ČVUT v Praze provedena zkouška odtrhem spojená se zjištěním tloušťky povlaku a následně byly provedeny i metalografické výbrusy připravených vzorků. Cílem této experimentální části je vyhodnocení nejvhodnějšího přídavného materiálu pro žárový nástřik elektrickým obloukem a to z pohledu technického i ekonomického zhodnocení.

8.1 Příprava vzorků

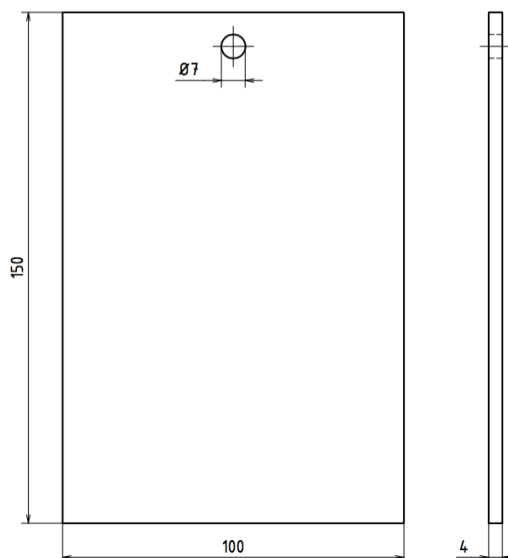
Zde bude popsán technologický postup přípravy vzorků pro experimentální část práce.

8.1.1 Rozměry a značení vzorků

K této části bakalářské práce byly poskytnuty Ústavem strojírenské technologie FS ČVUT v Praze vzorky (viz obr. č. 19) o rozměrech 150 x 100 mm (viz obr. č. 20) vyrobených ze stejného materiálu ČSN 11 523 (S355J0). V tab. č. 2 je popsán přehled značení, přídavný materiál pro žárový nástřik a barva nátěru vzorků.

Tab. 2: Značení vzorků

Označení vzorku	Přídavný materiál	Barva nátěru
0126.1 - 6	Zinek (Zn)	Červená
0127.1 - 6	Zinacor (Zn/Al)	Šedá
0103.5 0105.1 - 2 0105.4 - 5	Hliník (Al)	Bílá



Obr. 19: Připravený vzorek Obr.20: Rozměry vzorku

8.1.2 Předúprava povrchu

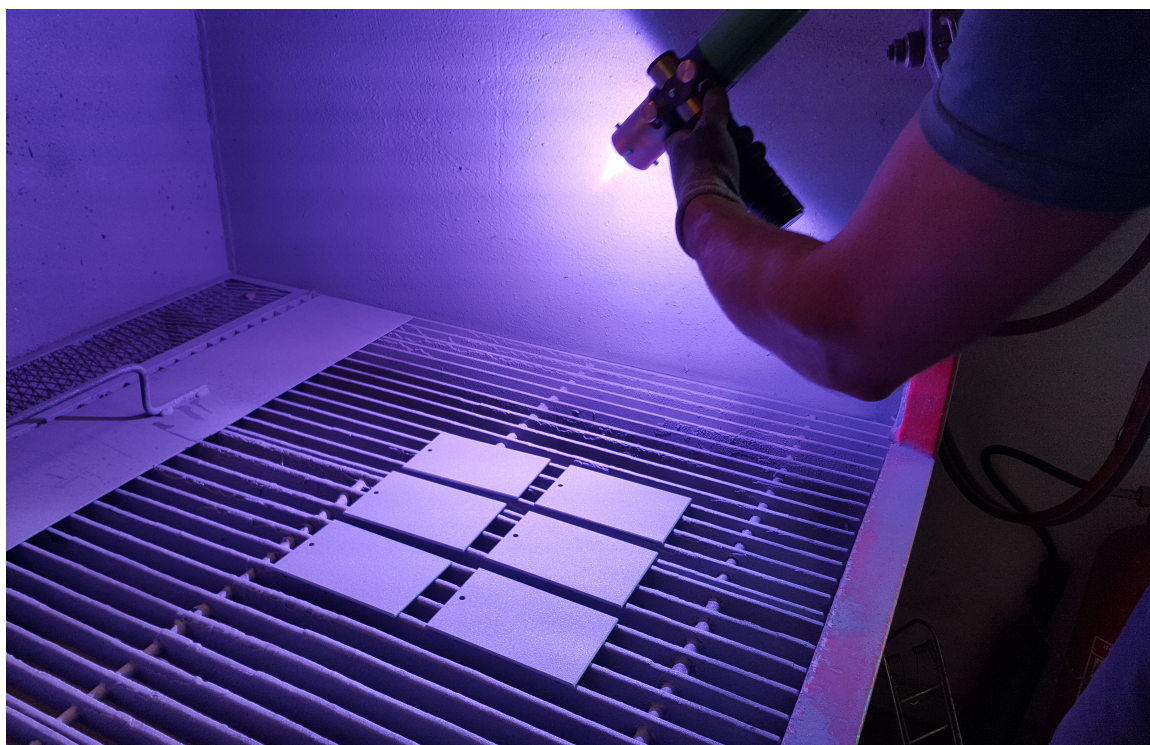
Jak již bylo zmíněno v kapitole 7, předúprava povrchu materiálu je jednou z nejdůležitějších operací pro kvalitní žárový nástřik. Připravené vzorky byly nejdříve podrobeny vstupní kontrole, kde byly ověřeny rozměry a dále byl prověřen povrch povlakované součásti. Další nezbytnou operací předúpravy povrchu bylo zbavení všech nečistot a mastnot ze vzorků a finální úpravou bylo otryskání vzorků hnědým korundem HK16 Sa 3 (viz obr. č. 21).



Obr. 21: Otryskaný vzorek

8.1.3 Vlastní nástřik

Vlastní žárový nástřik byl proveden metodou elektrického oblouku (viz obr. č. 22) s třemi různými přídatnými materiály. První sada šesti vzorků byla stříkána zinkem, druhá šestice zinacorem a zbylých pět vzorků hliníkem, z toho vzorek 0103.5 otevřenou tryskou, která obvykle vykazuje větší porezitu nástřiku ve srovnání s uzavřenou. Měření drsnosti povrchu po nástřiku, které bylo na vzorku 0103.5 provedeno, nevykázalo výrazné rozdíly.



Obr. 22: Nástřik elektrickým obloukem ve firmě S.A.F. Praha

Po žárovém nástřiku byla aplikována penetrace cihlové barvy, po 24 hodinách byl nanesen základní nátěr *Penguard Express Mio* od firmy *JOTUN* a přibližně po dvou hodinách od nanesení základního nátěru byl aplikován vrchní nátěr *Normadur 65 HS* od firmy *NOR-MAALI OY*. Nátěry byly zhotoveny dle technologického předpisu nátěrového systému *TP5-0013-05-NS 7*, který je součástí příloh k této bakalářské práci. Takto připravené vzorky (viz obr. č. 23) byly převzaty do laboratoře a dále testovány.



Obr. 23: Připravené vzorky od firmy S.A.F. Praha

8.2 Technologické vlastnosti vrstvy

8.2.1 Odtrhová zkouška

Odtrhová zkouška byla provedena pro změření kvality přilnavosti povrchu a probíhala dle platné normy ČSN ISO 24624.

Postup zkoušky

Nejdříve byly připraveny odtrhové hlavice, u kterých byl zdrsňen povrch brusným papírem, a poté se odmastily. Tyto hlavice byly přilepeny vhodným lepidlem - v tomto případě dvousložkovým epoxidovým lepidlem: *UHU PLUS ENDFEST* (viz obr. č. 24) na předem připravená a odmaštěná místa na vzorcích. Hlavice byly přitlačeny natolik, aby po jejich stranách zlehka vyteklo lepidlo, tím se eliminují nechtěné vzduchové bubliny pod hlavicemi. Takto přilepené odtrhové hlavice (viz obr. č. 25) se nechaly zaschnout alespoň po dobu 24 hodin. Po této době zaschnutí byl kolem hlavice proveden řez až na základní materiál, připevněn odtrhoměr: *Elcometer 506*[13] (viz obr.

č. 26) a proveden odtrh. Po odtržení lze z digitálního měřiče odečíst maximální hodnota napětí, která je potřebná pro odtržení hlavice.



Obr. 24: Dvousložkové epoxidové lepidlo a odtrhové hlavice



Obr. 25: Přilepené odtrhové hlavice



Obr. 26: Odrhoměr - Elcometer 506

Postup vyhodnocení zkoušky

U odtrhové zkoušky je zjišťována potřebná síla k odtržení hlavice a je popsáno porušení povrchu. Odrhová síla v MPa je hned po odtržení zobrazena na displeji odrhoměru. Charakter porušení je vyjádřen v procentuálním podílu porušení povlaku. [10]

Tab3: Hodnocení odtrhové zkoušky [10]

Klasifikace	Popis
A	Kohezní lom v podkladu
A/B	Adhezní lom mezi podkladem a první vrstvou
B	Kohezní lom první vrstvy
B/C	Adhezní lom mezi první a druhou vrstvou
-	Kohezní lom poslední vrstvy
-/Y	Adhezní lom mezi poslední vrstvou a lepidlem
Y	Kohezní lom v lepidle
Y/Z	Adhezní lom mezi lepidlem a zkušebním tělískem

8.2.2 Měření tloušťky

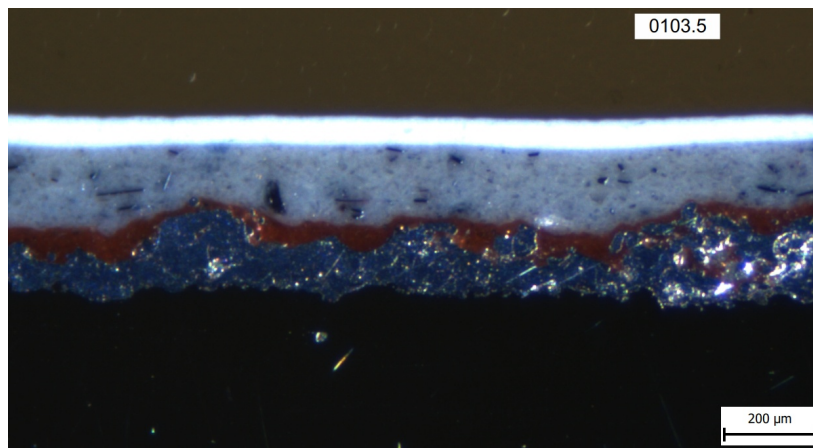
Nejprve bylo provedeno pouze měření tloušťky zárového nástřiku před nanesením dalších vrstev. Toto měření bylo zajištěno ve firmě *S.A.F. Praha*. Poté byly na vzorky nanесeny další nátěrové vrstvy a předány do laboratoře, kde proběhlo měření celkové tloušťky všech vrstev. Každý vzorek byl proměřen digitálním tloušťkoměrem: *PosiTector 6000* [14] (viz obr. č. 27) na deseti vybraných místech a výsledná hodnota tloušťky je průměrem těchto hodnot.



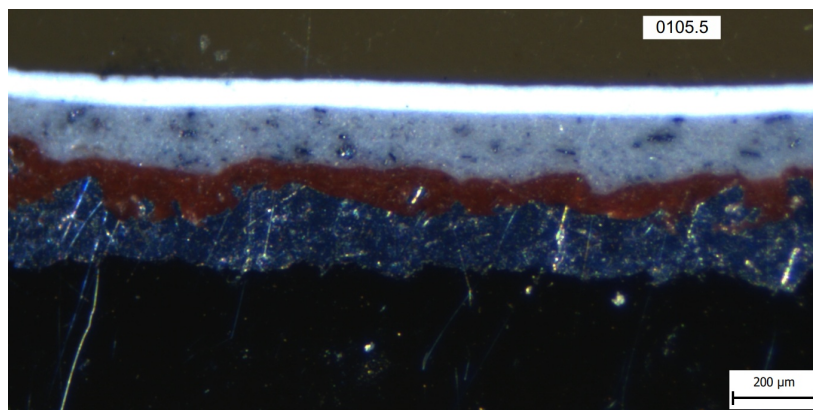
Obr. 27: Tloušťkoměr - PosiTector 6000

8.2.3 Metalografické výbrusy

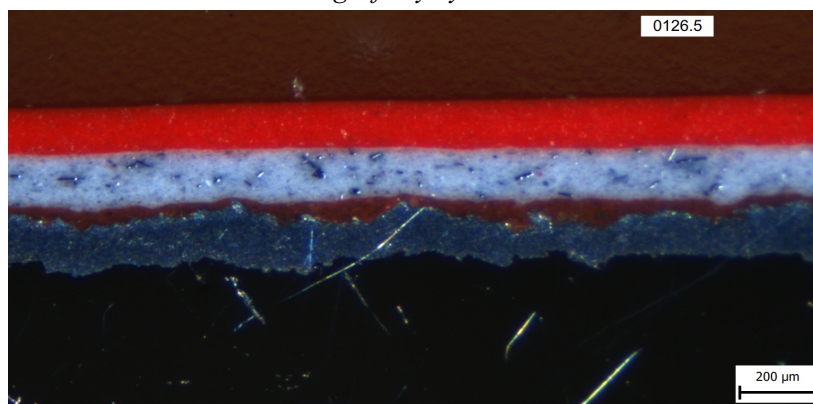
Metalografický výbrus je destruktivní metoda při které musíme inkriminované místo mechanicky oddělit od zbytku vzorku, po té zalít do pryskyřice a po jejím vytvrdnutí brousit a leštit. Takto připravené vzorky lze vložit do mikroskopu, kde jsou prováděny potřebná měření a focení. [11] V této práci byly předem vybrány čtyři vzorky (0103.5; 0105.5; 0126.5; 0127.5), na kterých se provedly metalografické výbrusy pro přesné zobrazení nanesených vrstev a jejich tloušťek (viz obr. č. 28 - 31).



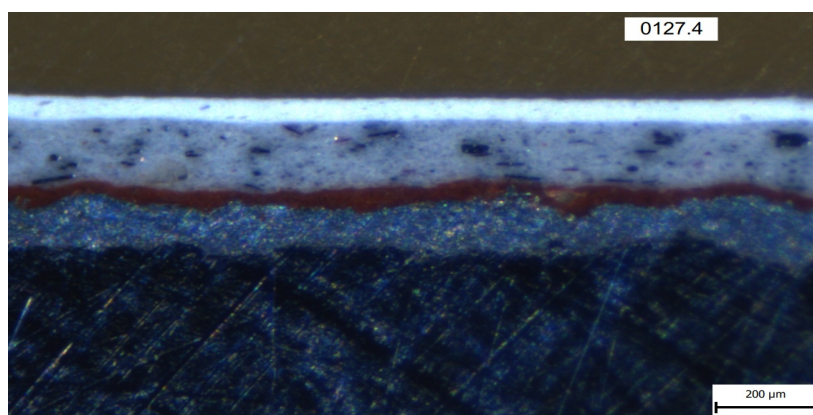
Obr. 28: Metalografický výbrus vzorku 0103.5



Obr. 29: Metalografický výbrus vzorku 0105.5



Obr. 30: Metalografický výbrus vzorku 0126.5



Obr. 31: Metalografický výbrus vzorku 0127.4

8.3 Vyhodnocení zkoušek

8.3.1 Vyhodnocení odtrhové zkoušky

Tab4: Vyhodnocení odtrhové zkoušky

číslo vzorku	číslo odtrhu					
	1	[MPa]	2	[MPa]	3	[MPa]
0126.1	100% A/B	8,7	100% A/B	7	100% A/B	7,3
0126.6	100% A/B	9,1	90% A/B 10% B/C	9,4	100% A/B	9,1
0127.2	80% A/B 20% Y/Z	11,5	100% A/B	11,8	100% A/B	12,1
0127.6	65% A/B 25% B/C 10% Y/Z	11,2	80% A/B 10% B/C 10% Y/Z	13,6	55% A/B 30% B/C 15% Y/Z	14,7
0105.1	100% Y/Z	7,2	20% B/C 80% Y/Z	9,7	10% B/C 90% Y/Z	8
0105.4	15% B/C 85% Y/Z	7,8	100% Y/Z	6,7	20% B/C 80% Y/Z	9,1
0103.5	100% Y/Z	7	15% B/C 85% Y/Z	9,9	20% B/C 80% Y/Z	10,2

Zhodnocení

U vzorků 0126.1 a 0126.6 proběhla odtrhová zkouška bez komplikací s výsledkem, který byl očekávaný a tudíž lze zkoušku považovat za úspěšnou. U vzorků 0127.2 a 0127.6 už výsledky nebyly tak přesvědčivé, za to zde byla potřeba větší síly k odtržení hlavice, což je zaznamenáno v tab. č. 4. Zkoušku lze považovat za úspěšnou. Avšak vzorky 0103.5; 0105.1; 0105.4 byly téměř vždy neúspěšné. Z velké části docházelo k adheznímu lomu mezi lepidlem a odtrhovou hlavicí. Příčin neúspěchu u těchto vzorků může být hned několik. Špatné odmaštění povrchu odtrhových hlavic nebo vzorků, minimální nebo žádné zdrsnění povrchu, nedostatečná pevnost lepidla. Po neúspěšných prvních odtrzích byly použity i další dvousložková lepidla například: *SCOTCH-WELD DP 810 3M*, bylo provedeno větší zdrsnění povrchu a v neposlední řadě úplné odstranění vrchního polyuretanového nátěru. Přesto výsledky odtrhové zkoušky byly neúspěšné a nadále docházelo k adheznímu lomu mezi lepidlem a odtrhovou hlavicí. Nejpravděpodobnější příčinou těchto výsledků nejspíše bude skutečnost, že vzorky 0103.5; 0105.1; 0105.2; 0105.4; 0105.5 s přídatným materiálem hliníku (Al) byly zároveň stříkány v jiném časovém období a to až o několik měsíců dříve, než sada vzorků 0126.1-6 a 0127.1-6. Delší časové období před samotnou

odtrhovou zkouškou mohlo způsobit, že žárový nástřík i nátěrové hmoty mohly lépe přilnout k základnímu podkladu.



Obr. 32: Výsledek odtrhové zkoušky vz. 0126.1

Obr. 33: Výsledek odtrhové zkoušky vz. 0127.2



Obr. 34: Výsledek odtrhové zkoušky vz. 0105.4



Obr. 35: Výsledek odtrhové zkoušky vz. 0103.5

8.3.2 Vyhodnocení tloušťky

Tab. 5: Vyhodnocení tloušťky po metalizaci

číslo vzorku	0126.1	0126.2	0126.3	0126.4	0126.5	0126.6
tloušťka [μm]	Ø 169	Ø 131	Ø 125	Ø 166	Ø 150	Ø 128
číslo vzorku	0127.1	0127.2	0127.3	0127.4	0127.5	0127.6
tloušťka [μm]	Ø 185	Ø 160	Ø 158	Ø 172	Ø 174	Ø 187
číslo vzorku	0105.1	0105.2	0105.4	0105.5		
tloušťka [μm]	Ø 208	Ø 169	Ø 186	Ø 222		
číslo vzorku	0103.5					
tloušťka [μm]	Ø 214					

Tab. 6: Vyhodnocení celkové tloušťky vrstvy

číslo vzorku	0126.1	0126.2	0126.3	0126.4	0126.5	0126.6
tloušťka [μm]	Ø 395±25	Ø 394±31	Ø 370±25	Ø 353±28	Ø 389±34	Ø 344±26
číslo vzorku	0127.1	0127.2	0127.3	0127.4	0127.5	0127.6
tloušťka [μm]	Ø 339±21	Ø 346±24	Ø 356±33	Ø 355±12	Ø 351±18	Ø 361±29
číslo vzorku	0105.1	0105.2	0105.4	0105.5		
tloušťka [μm]	Ø 419±24	Ø 353±26	Ø 371±29	Ø 412±26		
číslo vzorku	0103.5					
tloušťka [μm]	Ø 407±22					

Tab. 7: Vyhodnocení celkové tloušťky vrstvy z metalografického výbrusu

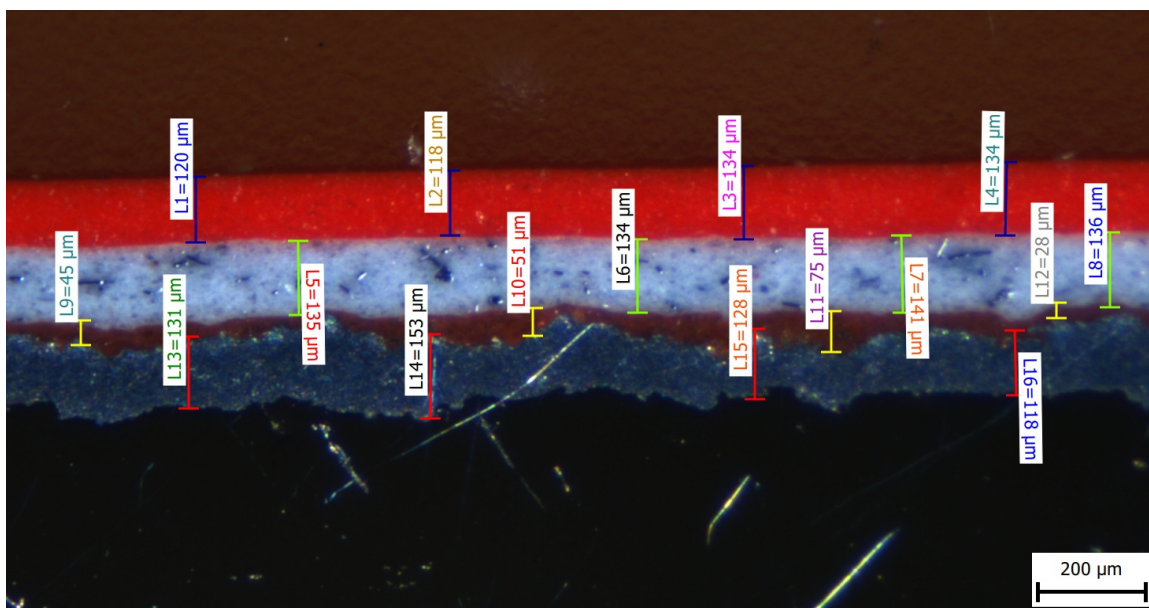
číslo vzorku	0103.5	0105.5	0126.5	0127.4
tloušťka [μm]	Ø 414	Ø 458	Ø 445	Ø 397

Zhodnocení

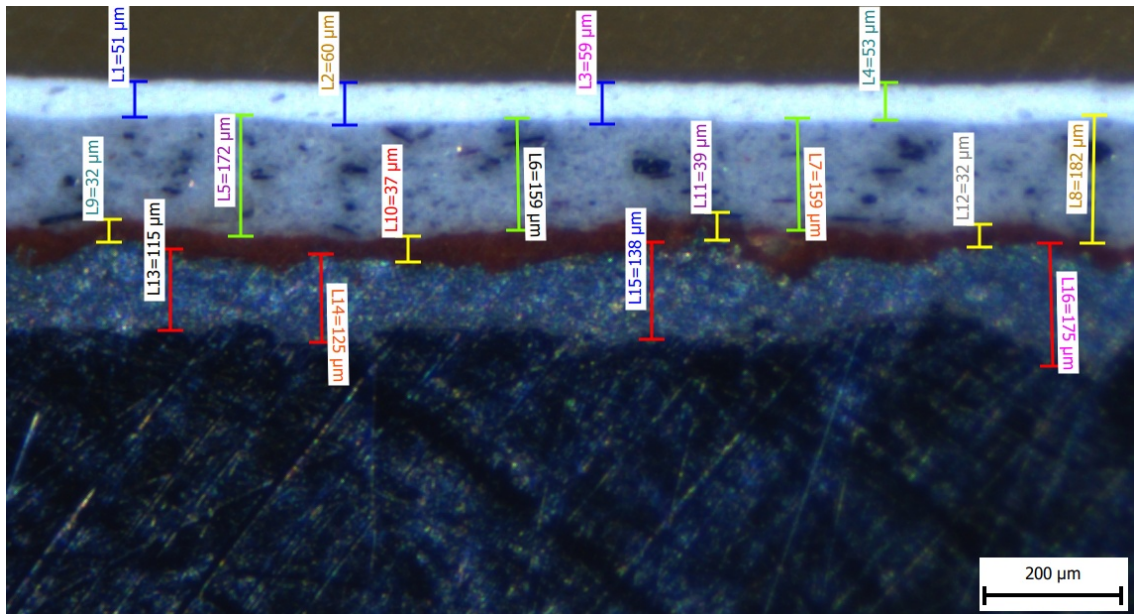
Požadavek na minimální průměrnou tloušťku žárového nástřiku vytvořeného metodou elektrického oblouku byl 100 μm u všech přídavných materiálů, což jak vyplývá z tab. č. 5. bylo dodrženo. Průměrné tloušťky měřené tloušťkoměrem - *PosiTector 6000*, který ihned vyhodnotil i odchylky měření jsou porovnatelné s průměrnými tloušťkami, které byly odečteny z metalografických výbrusů a skoro téměř se shodují. Takto provedené měření lze považovat za úspěšné.

8.3.3 Vyhodnocení metalografických výbrusů

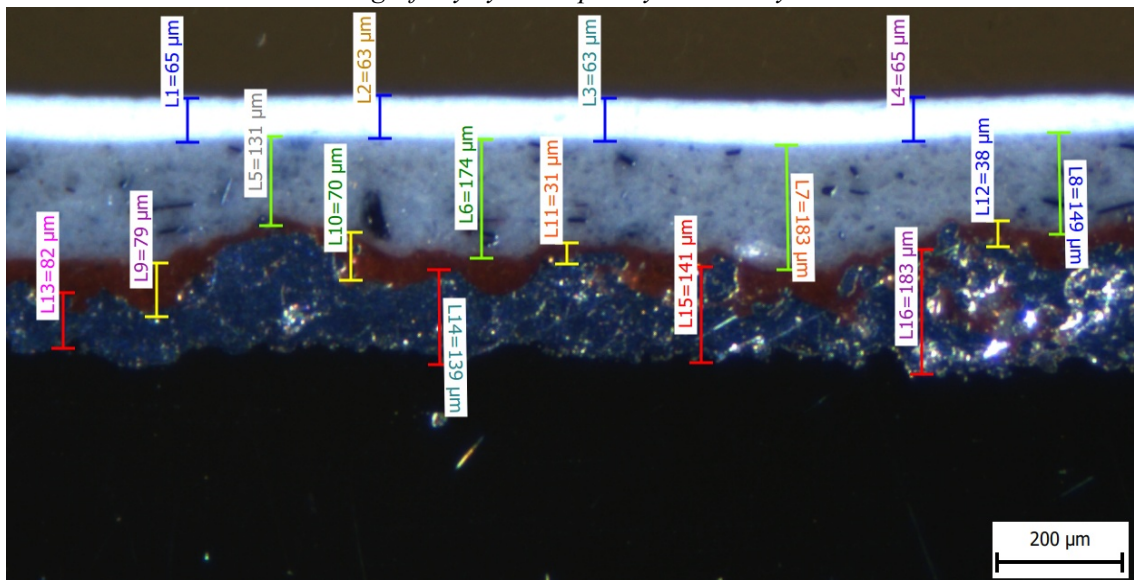
Metalografické výbrusy pro tuto práci byly vytvořeny z důvodu názorné ukázky aplikovaných povlaků a hlavně pro přesné proměření jejich tloušťek. Jako první byl vytvořen žárový nástřík, poté penetrace, dále nátěr *Penguard Express Mio* a poslední vrchní nátěr byl polyuretanový *Normadur 65 HS*, který je červené (0126.5), šedé (0127.4) a bílé barvy (0103.5; 0105.5). Z výbrusů (viz obr. č. 36 - 40) lze odečíst rozměry jednotlivých vrstev, které byly zhotoveny podle technologického předpisu nátěrového systému, který předepisuje průměrnou tloušťku suchého nátěru *Penguard Express Mio* nejméně 120 μm a průměrnou tloušťku suchého nátěru *Normadur 65 HS* nejméně 80 μm . Minimální průměrná tloušťka suchého nátěru *Penguard Express Mio* byla dodržena u všech vzorků, kdežto minimální průměrná tloušťka suchého nátěru *Normadur 65 HS* byla dodržena pouze u vzorku 0126.5. V ostatních případech je průměrná tloušťka vrchního nátěru menší než předepsaných 80 μm a to přibližně o 20 μm . Avšak doporučená minimální průměrná tloušťka obou těchto nátěrů, která je 200 μm je dodržena u všech testovaných vzorků.



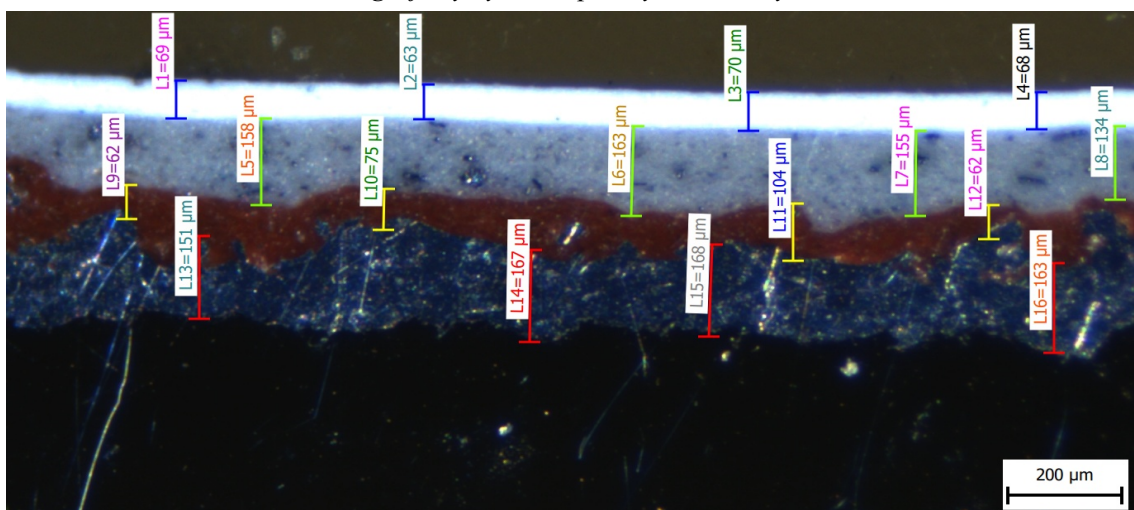
Obr. 36: Metalografický výbrus s přesnými rozměry vzorku 0126.5



Obr. 37: Metalografický výbrus s přesnými rozměry vzorku 0127.4



Obr. 38: Metalografický výbrus s přesnými rozměry vzorku 0103.5



Obr. 39: Metalografický výbrus s přesnými rozměry vzorku 0105.5

9 Technicko ekonomické zhodnocení

Technické i ekonomické rozhodnutí musí být bráno v úvahu hned na začátku rozhodování. V první řadě se odvíjí od požadavků na žárový nástřík. Jak již bylo uvedeno v teoretické části této práce, každý nástřík má své určité vlastnosti a vhodné aplikace a od toho se odvíjí i výsledná cena nástříku.

Pokud bude například požadována od povlaku, který bude stříkán na kov přilnavost alespoň 60 MPa a ochrana proti korozi, bude zapotřebí použít vysokorychlostního nástříku - HVOF, který takových vlastností dosahuje. S tímto požadavkem bude ale pevně spjata i cena, která je u tohoto nástříku dosti vysoká. Kdežto kdyby byla požadována přilnavost 20 MPa a opět ochrana proti korozi, byl by dostačující nástřík elektrickým obloukem, který je oproti vysokorychlostnímu nástříku značně levnější.

V této bakalářské práci bylo využito pro žárový nástřík pouze metody elektrického oblouku. Byly vybrány tři přídavné materiály a to hliník, zinek a zinacor a stejné nátěrové hmoty pro všech 17 vzorků. Vlastnosti i ceny těchto přídavných materiálů jsou odlišné. Jejich vlastnosti byly zkoumány v praktické části této práce a ekonomické podklady byly poskytnuty firmou *S.A.F Praha*.

Ceny přídavných materiálů a nátěrových hmot (ceny jsou uvedeny bez DPH):

- metalizační drát Zn - 87.50 Kč/kg (drát v sudech)
- metalizační drát Zn/Al - 114 Kč/kg (drát v sudech)
- metalizační drát Al - 125 Kč/kg (drát je na cívce)
- základní nátěr Penguard Express Mio - 230 Kč/litr
- vrchní nátěr Normadur 65 HS - 350 Kč/litr

Z provedené odtrhové zkoušky nejlepších výsledků dosahovaly vzorky 0126.1-6, na kterých byl použit přídavný materiál zinek, poté vzorky 0127.1-6 s přídavným materiálem zinacor a nehodnotitelné z odtrhové zkoušky jsou vzorky 0103.5; 0105.1; 0105.2; 0105.4 a 0105.5 s přídavným materiálem hliníku.

Z výsledků a cen přídavných materiálů lze určit jako nejvhodnější přídavný materiál zinek, který prokázal nejlepší přilnavost a zároveň disponuje nejnižší cenou z testovaných přídavných materiálů.

10 Závěr

V teoretické části této bakalářské práce byla rozebrána problematika žárových nástřiků. Zde byl popsán princip vytváření žárového nástřiku, jeho struktura a vlastnosti. Další částí práce bylo porovnání vybraných metod metalizace, kde byly představeny jednotlivé metody žárových nástřiků. Tyto metody byly rozděleny do dvou základních skupin a to podle použitého tepelného zdroje potřebného k natavení přídavného materiálu buďto ve formě prášku nebo drátu. Takto rozdělené metody byly podrobně popsány a mezi sebou porovnány. Poslední teoretická část této práce byla věnována předúpravě povrchu před samotným nanesením žárového nástřiku.

Praktická část práce se zaměřuje na jednu vybranou metodu žárového nástřiku a to metodu elektrického oblouku. Tato metoda využívá přídavného materiálu ve formě drátu a pro účely této práce byly použity tři přídavné materiály - zinek (Zn), hliník (Al) a zinacor (Zn/Al). Všechny tyto materiály byly nástřikány na stejné vzorky, u kterých byla provedena i stejná předúprava povrchu. Po samotném žárovém nástřiku byly dále nanесeny nátěrové hmoty.

Takto připravené vzorky byly podrobeny odtrhové zkoušce pro zjištění nejlepší přilnavosti přídavného materiálu k základnímu povrchu součásti. Dále byla zjišťována samotná tloušťka žárového nástřiku a celková tloušťka povlakovaného systému. Pro přesné znázornění jednotlivých vrstev a jejich tloušťek byly zhotoveny metalografické výbrusy. Ze samotných výsledků zkoušek už lze vyčíst, jak který přídavný materiál vyhověl požadavkům. V poslední části této práce je uvedeno ucelené shrnutí jak technické, tak i ekonomické, z kterého lze jednoznačně vyčíst, který přídavný materiál má nejlepší přilnavost a zároveň je ekonomicky nejvýhodnější.

Seznam použité literatury

- [1] HOUDKOVÁ ŠIMŮNKOVÁ, Šárka, ENŽL, Radek, BLÁHOVA, Olga. Žárové nástřiky: moderní technologie povrchových úprav [online]. 2003 [cit. 2016-08-01]. Dostupné z WWW: <<http://www.kmm.zcu.cz/CD/content/index.html>>
- [2] LÍBAL, M: Stanovení hlavních parametrů ovlivňujících přilnavost a odolnost povlaků žárových nástřiků vytvořených elektrickým obloukem, [Diplomová práce], Plzeň ZČU, FST, KMM, 2013
- [3] AMBROŽ, Oldřich, KAŠPAR, Jiří. Žárové nástřiky a jejich průmyslové využití. 1. vyd. Praha: SNTL, 1990. 320 s. ISBN 80-03-00347-4.
- [4] TEPLÝ, M: Renovace strojních zařízení, [Bakalářská práce], Brno VUT, FSI, 2010
- [5] RACKOVÁ, Š: Tribologické charakteristiky žárově stříkaných povlaků za vysokých teplot, [Diplomová práce], Plzeň ZČU, FST, KMM, 2007.
- [6] SILDBERGER, R: Optimalizace parametrů nástřiku elektrickým obloukem, [Diplomová práce], Brno VUT, FSI, 2008
- [7] KUBÍČEK, Jaroslav. Renovace a povrchové úpravy. Brno, 2006. 90 s. Vysoké učení technické v Brně, fakulta strojního inženýrství. Syllabus. Dostupný z WWW: http://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/opory_soubory/renovace_a_povrchove_upravy_kubicek.pdf
- [8] ZIMMERMANN, Stefan. ColdGasSpraying : Technology and Materials. [s.l.]: [s.n.], 2007 tisk. 31 s.
- [9] Kraus V.: Povrchy a jejich úpravy; Plzeň 2000
- [10] Praha: Český normalizační institut, 2007.7. ČSN EN ISO 4624 (673077). Nátěrové hmoty – *Odrhová zkouška přilnavosti* ČSN EN ISO
- [11] CUBE.CZ [online] 2014 [cit. 2016-08-05]. Dostupné z WWW: <<http://www.cube.cz/sluzby/metalograficke-vybrusy.htm>>
- [12] PLASMAMETAL.CZ [online] 2013 [cit. 2016-07-29]. Dostupné z WWW: <http://www.plasmametal.cz/img/vektory/spray_powded_supply_cz.png>

- [13] Gamin. *Digitální odtrhoměr Elcometer 506*[online]. 2013 [cit. 2016-08-09]. Dostupné z WWW: <http://www.gamin.cz/soubory/1562.pdf>
- [14] DeFelsko. *Digitální tloušťkoměr PosiTector 6000*[online]. 2012. Dostupné z WWW: <http://www.defelsko.com/p6000/manuals/P6000_QuickGuide_7.3.pdf>
- [15] Nástřik elektrickým obloukem. SERVIS ARMATUR spol. s.r.o. [online]. 2012 [cit. 2016-08-02].Dostupné z WWW: <<http://www.servisarmatur.cz/index.php?page=electric-arc-spray>>

Seznam tabulek

<i>Tab. 1: Porovnání jednotlivých metod žárových nástřik [6]</i>	31
<i>Tab. 2: Značení vzorků</i>	35
<i>Tab 3: Hodnocení odtrhové zkoušky [10]</i>	40
<i>Tab 4: Vyhodnocení odtrhové zkoušky</i>	43
<i>Tab. 5: Vyhodnocení tloušťky po metalizaci</i>	45
<i>Tab. 6: Vyhodnocení celkové tloušťky vrstvy</i>	45
<i>Tab 7: Vyhodnocení celkové tloušťky vrstvy z metalografického výbrusu</i>	45

Seznam grafů

<i>Graf 1: Snížení přilnavosti povlaků v důsledku oxidace povrchu podložky [3]</i>	34
--	----

Seznam obrázků

<i>Obr. 1: Podstata žárového nástřiku [2]</i>	10
<i>Obr. 2: Schéma procesu vytváření žárového nástřiku [2]</i>	11
<i>Obr. 3: Schéma struktury žárového nástřiku [2]</i>	12
<i>Obr. 4: Splat [4]</i>	12
<i>Obr. 5: Rozdělení žárových nástřiků [2]</i>	15
<i>Obr. 6: Žárový nástřik plamenem</i>	16
<i>Obr. 7: Schéma žárového nástřiku plamenem - přídavný materiál prášek [2]</i>	17
<i>Obr. 8: Schéma žárového nástřiku plamenem - přídavný materiál drát [2]</i>	18
<i>Obr. 9: Schéma žárového nástřiku detonační vlnou [6]</i>	19
<i>Obr. 10: Vysokorychlostní nástřik plamenem - HVOF</i>	20
<i>Obr. 11: Schéma principu vysokorychlostního nástřiku plamene - HVOF [12]</i>	21
<i>Obr. 12: Plazmatický nástřik</i>	22
<i>Obr. 13: Schéma principu plazmatického nástřiku [6]</i>	23
<i>Obr. 14: 1 - princip plynové stabilizace, 2 - princip kapalinové stabilizace [6]</i>	24
<i>Obr. 15: Nástřik elektrickým obloukem [15]</i>	25
<i>Obr. 16: Schéma principu nástřiku elektrickým obloukem [6]</i>	26
<i>Obr. 17: Schéma stříkací pistole pro nástřik studeným plynem [6]</i>	28
<i>Obr. 18: Porovnání procesů žárového nástřiku z hlediska teploty a rychlosti dopadajících částic [6]</i>	30
<i>Obr. 19: Připravený vzorek</i>	36
<i>Obr. 20: Rozměry vzorku</i>	36
<i>Obr. 21: Otryskaný vzorek</i>	36
<i>Obr. 22: Nástřik elektrickým obloukem ve firmě S.A.F. Praha</i>	37
<i>Obr. 23: Připravené vzorky od firmy S.A.F. Praha</i>	38
<i>Obr. 24: Dvousložkové epoxidové lepidlo a odtrhové hlavice</i>	39
<i>Obr. 25: Přilepené odtrhové hlavice</i>	39
<i>Obr. 26: Odtrhoměr - Elcometer 506</i>	40
<i>Obr. 27: Tloušťkoměr - PosiTector 6000</i>	41
<i>Obr. 30: Metalografický výbrus vzorku 0126.5</i>	42
<i>Obr. 31: Metalografický výbrus vzorku 0127.4</i>	42

<i>Obr. 28: Metalografický výbrus vzorku 0103.5</i>	42
<i>Obr. 29: Metalografický výbrus vzorku 0105.5</i>	42
<i>Obr. 33: Výsledek odtrhové zkoušky vz. 0127.2</i>	44
<i>Obr. 35: Výsledek odtrhové zkoušky vz. 0103.5</i>	44
<i>Obr. 32: Výsledek odtrhové zkoušky vz. 0126.1</i>	44
<i>Obr. 34: Výsledek odtrhové zkoušky vz. 0105.4</i>	44
<i>Obr. 36: Metalografický výbrus s přesnými rozměry vzorku 0126.5</i>	46
<i>Obr. 37: Metalografický výbrus s přesnými rozměry vzorku 0127.4</i>	47
<i>Obr. 38: Metalografický výbrus s přesnými rozměry vzorku 0103.5</i>	47
<i>Obr. 39: Metalografický výbrus s přesnými rozměry vzorku 0105.5</i>	47

