

Univerzita Pardubice

Dopravní fakulta Jana Pernera

**Aplikace technologií žárového nástřiku
v oblasti zvyšování životnosti a spolehlivosti
u namáhaných součástí silničních vozidel**

Pavla Kosinová

Bakalářská práce

2010

Univerzita Pardubice
Dopravní fakulta Jana Pernera
Akademický rok: 2009/2010

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Pavla KOSINOVÁ**
Studijní program: **B3709 Dopravní technologie a spoje**
Studijní obor: **Dopravní prostředky-Silniční vozidla**
Název tématu: **Aplikace technologií žárového nástřiku v oblasti zvyšování životnosti a spolehlivosti u extrémně namáhaných součástí silničních vozidel.**
Zadávací katedra: **Katedra dopravních prostředků a diagnostiky**

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

1. Mechanismy a projevy opotřebení strojních součástí - klasifikace a příčiny.
2. Charakteristika současného stavu v oblasti renovačních technologií.
3. Popis procesu tvorby žárových povlaků a optimalizace jejich technologických parametrů pro konkrétní (vhodně zvolenou) aplikaci a přídavný materiál.
4. Ověření vnitřní stavby (přilnavosti, soudržnosti, pórovitosti) povlaku aplikovaného na povrch zvolené součásti v pracovním prostoru spalovacího motoru - experimentální zhodnocení provedeného nástřiku a jeho vyhodnocení na začátku i po určité době provozování sledovaného dílce.
5. Závěr - posouzení výběru vhodné technologie žárového nástřiku včetně provedení stručné ekonomické rozvahy.

Rozsah grafických prací:

Rozsah pracovní zprávy:

Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná**

Seznam odborné literatury:

- [1] Ptáček L. a kol.: Nauka o materiálu I. 1. vydání, Brno, Akademické nakladatelství CERM, s.r.o., 2001, 505 stran, ISBN 80 - 7204 - 193 - 2.
- [2] Ptáček L. a kol.: Nauka o materiálu II.. 1. vydání, Brno, Akademické nakladatelství CERM, s.r.o., 1999, 350 stran, ISBN 80 - 7204 - 130 - 4.
- [3] Macek K., Zuna P.: Nauka o materiálu. 2. vydání, Praha, vydavatelství ČVUT, 2002, 209 stran, ISBN 80 - 01 - 02543 - 8.
- [4] Ambrož O., Kašpar J.: Žárové nástřiky a jejich pŕmyslové využití. 1. vydání, vydalo SNTL Praha, 1990, 320 stran, ISBN 80-03-00347-4.
- [5] Andrt J.: Údržba a opravy automobilů Škoda 105, 120, 130, Garde a Rapid. 5. vyd. Praha : SNTL, 1986. 480 stran. ISBN 04-233-86.
- [6] Vlk.F.: Převodová ústrojí motorových vozidel. Brno 2000, ISBN 80-238-5275-2.
- [7] Firemní materiály společnosti DTD Future s.r.o.

Vedoucí bakalářské práce:

doc. Dr. Ing. Libor Beneš

Katedra mechaniky, materiálů a částí strojů

Datum zadání bakalářské práce: **26. února 2010**

Termín odevzdání bakalářské práce: **31. května 2010**



prof. Ing. Bohumil Culek, CSc.

děkan

L.S.



doc. Ing. Miroslav Tesař, CSc.

vedoucí katedry

dne

Prohlašuji:

Tuto práci jsem vypracovala samostatně. Veškeré literární prameny a informace, které jsem v práci využila, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

Byla jsem seznámena s tím, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména se skutečností, že Univerzita Pardubice má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla podle § 60 odst. 1 autorského zákona, a s tím, že pokud dojde k užití této práce mnou nebo bude poskytnuta licence o užití jinému subjektu, je Univerzita Pardubice oprávněna ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložila, a to podle okolností až do jejich skutečné výše.

Souhlasím s prezenčním zpřístupněním své práce v Univerzitní knihovně.

V Pardubicích dne 24. 05. 2010

Pavla Kosinová

Poděkování

Ráda bych poděkovala panu doc. Dr. Ing. Liboru Benešovi za cenné rady, odbornou pomoc a věcné připomínky k obsahové i formální stránce bakalářské práce. Také za pomoc při získání samotného vzorku pro realizované testy.

Děkuji zástupci firmy DTD Future, s.r.o., ing. Tomáši Koudelkovi, který zabezpečil realizaci analyzovaného žárového nástřiku na zkušební vzorky.

V závěru chci vyjádřit díky své rodině za pomoc, pochopení a podporu během celého studia.

Anotace:

Předložená bakalářská práce je zaměřena na aplikaci technologie žárového nástřiku při zvyšování životnosti provozně namáhaných součástí. Těžiště práce spočívá v porovnání vlastností vzorků základního materiálu a povlakovaného povrchu, který byl ošetřen metodou žárového nástřiku. Jedná se o jednu z významných metod zvyšujících provozní spolehlivost dílců a konstrukcí, umožňující zajistit jejich funkci ve zcela specifických podmínkách.

Klíčová slova: opotřebení, renovace, žárový nástřik, navařování, metalografické zkoušky.

Annotation:

Submitted work is focused on the application of thermal sprayed coatings in the field of increasing the durability of extremely loaded machine parts. The main contribution of the work consists in the comparison of the basic and coated surfaces, after the thermal sprayed treatment. The technology can represent one of the significant methods for enhancement of the operational reliability of the machine parts and structures. This surface treatment can ensure their function in entirely particular conditions.

Key words: wear, renovation, thermal sprayed coatings, hard surfacing, metallographic testing.

Obsah

1.	MECHANISMY A PROJEVY OPOTŘEBENÍ STROJNÍCH SOUČÁSTÍ	9
1.1.	Jednotlivé druhy opotřebení	10
1.1.1.	Adhezivní	11
1.1.2.	Abrazivní	11
1.1.3.	Erozivní	12
1.1.4.	Kavitační	13
1.1.5.	Únavové	13
1.1.6.	Vibrační	14
2.	RENOVACE ŽÁROVÝM NÁSTŘIKEM A NAVAŘOVÁNÍM	15
2.1.	Žárový nástřik	15
2.2.	Navarování	18
3.	POPIS PROCESU TVORBY ŽÁROVÝCH POVLAKŮ	20
3.1.	Vstupní kontrola	21
3.1.1.	Kontrola povrchu před nástřikem	21
3.1.2.	Kontrola rozměrů součásti	21
3.2.	Čištění	21
3.3.	Krytování	21
3.4.	Tryskání	22
3.5.	Nástřik	22
3.6.	Parametry ovlivňující kvalitu povlaku	22
3.7.	Typy žárových nástřiků	24
3.7.1.	Nástřik prášku bez přetavení	24
3.7.2.	Nástřik prášku s přetavením	25
3.7.3.	Nástřik keramických prášků	25
3.7.4.	Nástřik plastových prášků	26
3.8.	Metody žárového nástřiku	26
3.8.1.	Tepelná energie hoření směsi paliva a kyslíku	26
3.8.2.	Tepelná energie elektrického zdroje	27

4.	ANALÝZA POVLAKU.....	29
4.1.	Bending (ohybový) test	31
4.1.1.	Vyhodnocení	31
4.2.	Zkouška abrazivního opotřebení.....	32
4.2.1.	Vyhodnocení	33
4.3.	Zkouška nasákavosti.....	34
4.3.1.	Vyhodnocení	35
5.	ZÁVĚR.....	36
6.	LITERATURA	37
7.	SEZNAM OBRÁZKŮ	38
8.	SEZNAM TABULEK.....	39

1. Mechanismy a projevy opotřebení strojních součástí

Opotřebení součástí strojů ve velké míře souvisí hlavně s opotřebováním povrchů těchto částí při samotném provozu. Tímto opotřebováním se pak chápe úbytek materiálu z povrchu tuhého tělesa působením jiného povrchu nebo materiálu. Tento úbytek lze charakterizovat velikostí zatížení a typem vzájemného pohybu, který vede k adhezivnímu, abrazivnímu či únavovému mechanismu opotřebení. Kvalifikace jednotlivých mechanismů je však v literárních pramenech rozdílná.

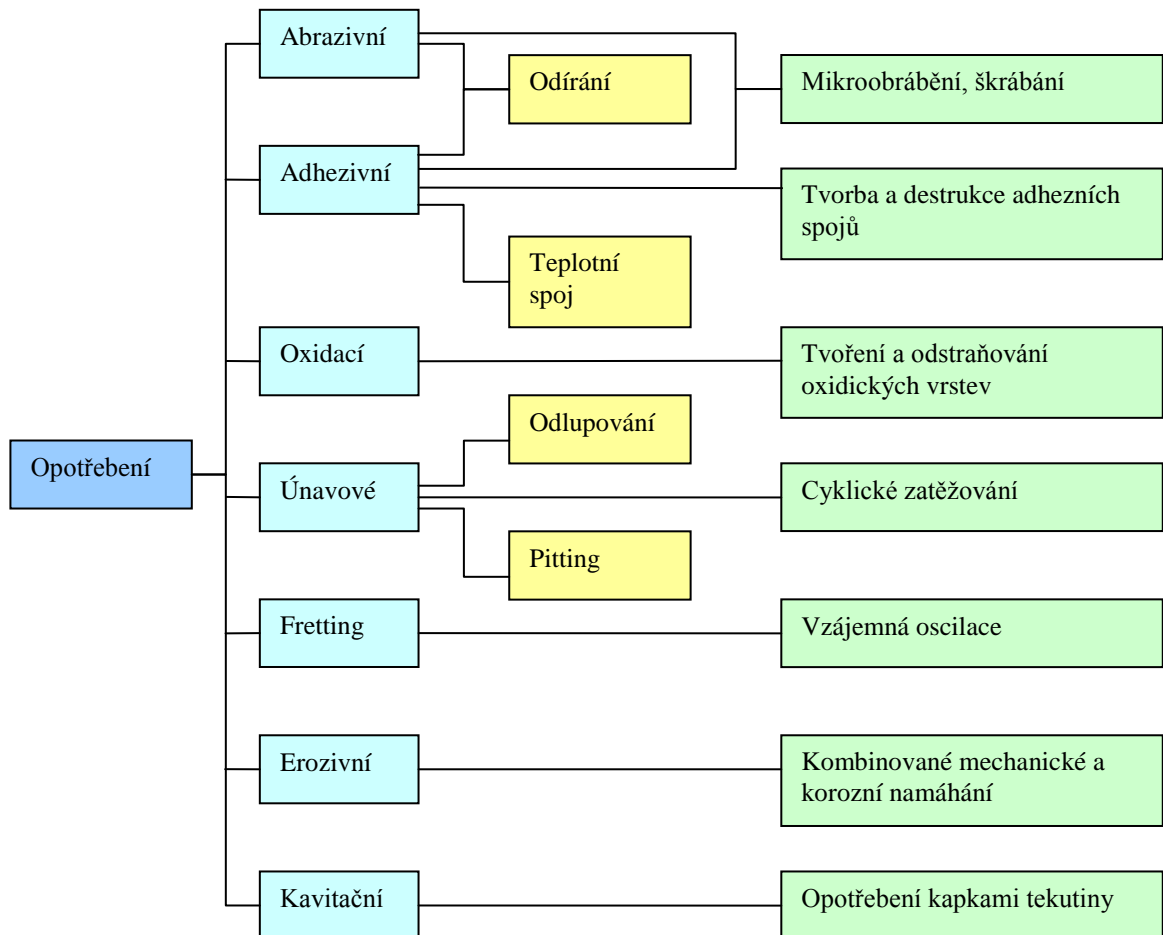
Dle Pawlowskeho lze opotřebení dělit do následujících skupin:

- abrazivní
- adhezivní
- erozivní
- únavové
- korozivní mechanismy opotřebení
- tzv. fretting (opotřebení způsobené vzájemnou oscilací povrchů; částice materiálů zůstávají mezi povrchy a způsobují další opotřebení)

Dle ČSN 015050 se opotřebení rozděluje na šest základních druhů:

- adhezivní
- abrazivní
- erozivní
- kavitační
- únavové
- vibrační

Další rozdělení provedl Burakowski, a to do sedmi skupin, viz Obr. 1.



Obr. 1 – Rozdělení opotřebení dle Burakowskeho [1]

1.1. Jednotlivé druhy opotřebení

Opotřebení funkčních povrchů rozhodujících součástí nebo konstrukčních uzlů a strojních zařízení má ve většině případů vliv na životnost a spolehlivost strojů a strojních zařízení. Proces opotřebení obvykle vede jen k postupnému zhoršování technických a ekonomických parametrů, a proto se mu věnuje v praxi podstatně menší pozornost, než procesům náhlého porušení součástí, jako jsou únavové lomy. Průzkumy však ukazují, že v 80% případech primární příčinou vyřazení strojů a strojních zařízení z provozu je opotřebení.

1.1.1. Adhezivní

Adhezivní opotřebení vzniká v případě malých rychlostí pohybu a vysokého kontaktního tlaku. Dochází k tzv. lokálním svarům za studena, jejich pevnost může být vyšší než pevnost materiálu těles. Výsledkem je vytrhávání částic materiálu s nižší mezí pevnosti, např. kolo – kolejnice, kluzná ložiska.

Na vznik a průběh adhezivního opotřebení mají vliv zejména:

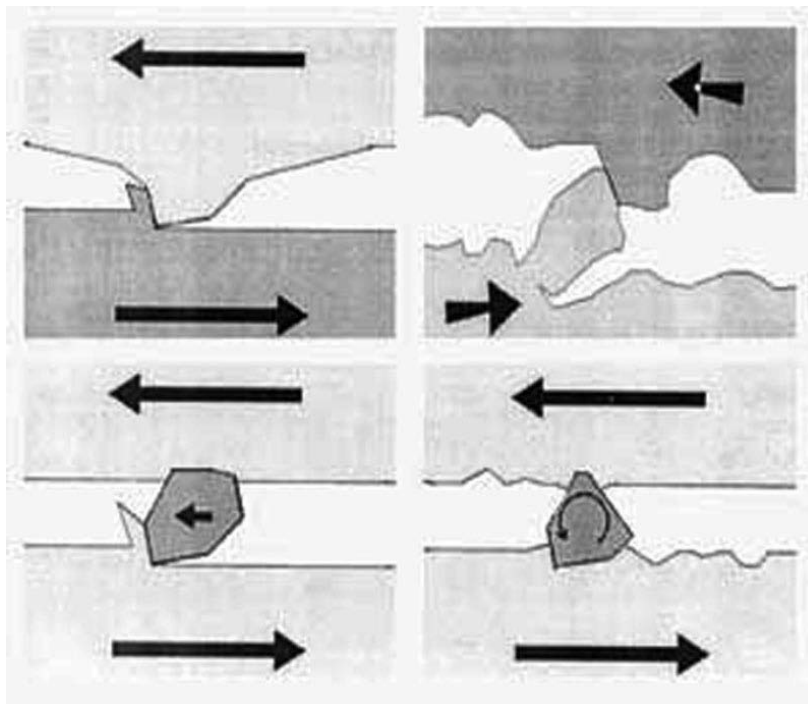
- hloubku vnikání a poloměr zakřivení povrchových mikronerovností
- velikost zatížení a rychlost relativního pohybu
- schopnost materiálu vytvářet adhezní spoje.

1.1.2. Abrazivní

K abrazivnímu opotřebení dochází v případě, kdy jsou v kontaktu materiály, z kterých je jeden výrazně tvrdší než druhý, nebo když jsou mezi dvěma povrchy přítomny tvrdé částice, nebo když jde o zpracování materiálu, který obsahuje tvrdé částice, např. pracovní části strojů pro zpracování půdy. Lze říci, že princip abrazivního opotřebení je v zásadě shodný s principem obrábění či broušení materiálu.

Na toto opotřebení má vliv řada faktorů:

- tvrdost opotřebovávaného materiálu
- tvrdost, křehkost a velikost abrazivních částí
- zatížení a relativní rychlost pohybu povrchů.



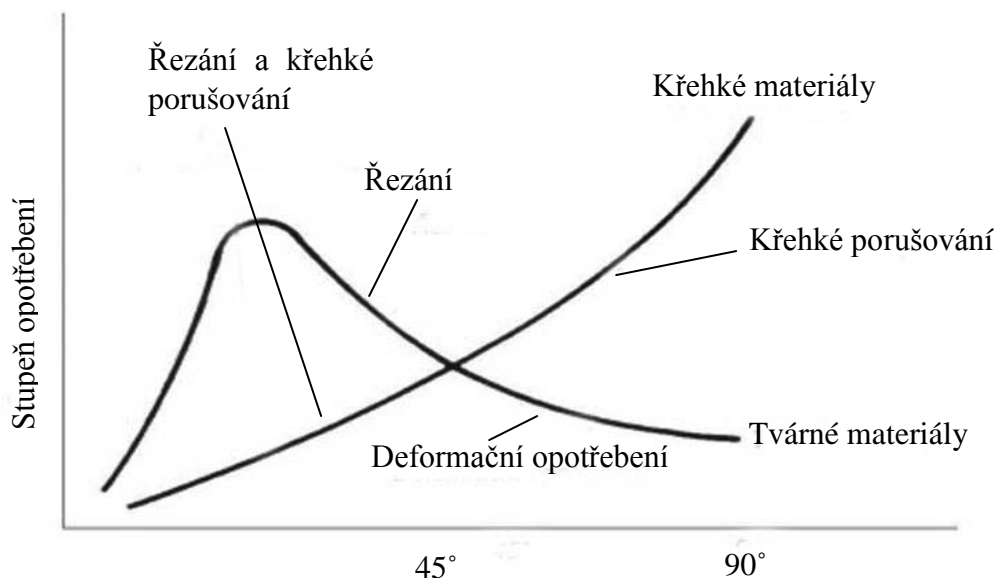
Obr. 2 – Mechanismy abrazivního opotřebení [1]

1.1.3. Erozivní

Tuto mechanickou deformaci povrchových struktur materiálu způsobuje dopad částic v proudícím médiu vysokou kinetickou energií. Částice může být unášena proudem kapaliny (čerpadla, turbíny), nebo proudem plynu (vzduchotechnika, ventilátory). Intenzita opotřebení je závislá na:

- rychlosti a úhlu dopadu části
- chemickém složení proudícího média
- velikosti, tvaru a tvrdosti částic

Při nízkém úhlu dopadu erodentu je mechanismus opotřebení obdobný abrazivnímu. Zde je pak rozhodující pro odolnost proti opotřebení tvrdost povrchu materiálu. Při vysokém úhlu dopadu dochází k plastické deformaci. Tohoto se využívá při otryskávání materiálu.



Obr. 3 – Vliv úhlu dopadu erodentu na míru opotřebení [1]

1.1.4. Kavitační

Kavitační opotřebení charakterizováno oddělováním částic kovu z povrchu funkční plochy v místech zániku kavitačních „bublin“, které vznikají v kapalině. Ke kavitaci dochází v proudící kapalině v místech, kde se zvyšuje rychlost proudění, a tím dojde ke snížení tlaku kapaliny. Vzniknou kavitační bubliny vyplněné plynem, jejichž zánik vyvolá hydrodynamické rázy. Rázy působí na povrch materiálu jako kontaktní tlaky u opotřebení povrchovou úpravou.

Kavitační opotřebení se vyskytuje např. u částí spalovacích motorů – hlavy válců, ve vodních turbínách, čerpadlech, vodovodech apod.

1.1.5. Únavové

Při střídavém zatěžování a odlehčování povrchovou silou dochází k tzv. únavovému opotřebení. Pokud je namáhání pod mezí kluzu materiálu, vzniká vysokocyklová únava, je-li namáhání nad mezí kluzu, vzniká nízkocyklová únava. Únavové opotřebení je typickým mechanismem ovlivňujícím životnost valivých ložisek. Dále se s ním můžeme setkat u dvojkolí a kolejnic, ozubených kol, zdvihátek ventilů spalovacích motorů.

Při tomto druhu opotřebení vznikají postupně se rozšiřující podpovrchové trhliny, které vedou následně k odlupování části povrchové vrstvy. Vznik a intenzita poškození jsou velmi závislé na provozních podmínkách.

1.1.6. Vibrační

Vibrační opotřebení vzniká v místech kmitavých tangenciálních posuvů funkčních ploch při spolupůsobení normálového zatížení. Obvykle při vibračním opotřebení dochází ke vzniku oxidů železa. V praxi může docházet k vibračnímu opotřebení u valivých ložisek, nalisovaných spojení náboje a hřídele apod.

Na průběh a intenzitu vibračního opotřebení má vliv několik faktorů, zejména:

- amplituda pohybu
- frekvence pohybu
- měrný tlak ve styku součástí
- vlastnosti materiálu

2. Renovace žárovým nástřikem a navařováním

Renovace ve strojírenství znamená opravu strojní součásti, tj. obnovení funkčních schopností poškozené strojní součásti. Kvalita renovované součásti by měla odpovídat kvalitě součásti nové. Ve skutečnosti však může být nižší i vyšší.

Požadavky na zvýšení výkonových charakteristik strojů, strojních zařízení i nástrojů spolu se zvýšením jejich životnosti, spolehlivosti a ekonomické efektivity při použití standardních materiálů postupně naráží na meze. Další možnost poskytují kompozitní materiály, které kombinují charakteristické vlastnosti kovových materiálů, keramických materiálů nebo polymerních materiálů.

Také způsoby a metody nanášení těchto materiálů se stále vyvíjejí a volba použitého způsobu renovační technologie je vždy závislá na konkrétních provozních podmínkách, pro které je daná součást nebo konstrukční celek určena.

2.1. Žárový nástřik

Žárové nástřiky představují perspektivní technologii poskytující funkčně efektivní povlaky v tloušťce větší než 50 μ m, používané v mnoha odvětvích průmyslu. Jejich předností je možnost optimálního přizpůsobení povrchových vlastností součásti provozním podmínkám.

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

- odolnost proti mechanickému opotřebení (abraze, eroze, kavitace)
- vynikající tribologické vlastnosti (samomazné, kluzné, těsnící povlaky)
- odolnost proti oxidaci, korozi a proti působení agresivního chemického prostředí
- odolnost proti extrémně vysokým teplotám

- doplnění rozměrů, doplnění chybějícího materiálu
- elektroizolační a elektrovedivé povlaky
- biokompatibilní, zdravotně nezávadné povlaky
- povlaky se speciálními fyzikálními vlastnostmi (supravodivost, optika, odolnost proti záření, iontově reagující povlaky)
- dekorativní povlaky

Úspěšná aplikace žárově a plazmaticky stříkaných povlaků na bázi plastů, kovů, slitin, oxidických a neoxidických keramik a cermetů obecně zvyšuje provozní spolehlivost povlakovaných dílců a komponent, umožňuje jejich funkci ve zcela specifických podmínkách provozu, přináší velké finanční úspory a je základem pro nová nekonvenční technická řešení a široké aplikační využití ve sféře průmyslové praxe.



Obr. 4 – Příklad žárového nástřiku na čepu [1]

Tabulka 1 uvádí některé příklady využití povlaků vytvořených technologií žárového nástřiku podle mechanismu opotřebení resp. vlastnosti povrchu. Pro jednotlivé charakteristické vlastnosti povrchu povlaků uvádíme některé typické aplikace a příslušné materiály povlaku.

Tabulka 1 – Příklady využití povlaků vytvořených technologií žárového nástřiku [6]

Mechanismus opotřebení, Vlastnosti povrchu povlaku	Typické aplikace	Vhodné povlaky
Adheze	kluzná ložiska, vymačkané plochy čepů válců, vedení	Bronz, kompozice, Mo, Cr ₃ C ₂ /NiCr
Abraze, Eroze	šneky, plunžry, pístní tyče, části sklářských forem	WC/Co, Cr ₂ O ₃ , Al ₂ O ₃ , NiCrBSi
Kavitace	komory vodních turbín, rozváděcí lopatky vodních turbín, komory, vložky válců spalovacích motorů	Chrom-uhlíková martenzitická nerezavějící ocel, hliníkový bronz, NiCrBSi,
Otěr	součástky textilních strojů, kluzná uložení, pneumatické a hydraulické prvky, vedení	WC/Co, Cr ₂ O ₃ , Al ₂ O ₃ , Mo, NiCrBSi,
Tepelné bariéry	komponenty spalovacích komor a proudových motorů, části sklářských forem	ZrO ₂ /CaO/MgO/Y ₂ O ₃ , ZrSiO ₄ ,
Vysokoteplotní koroze	rozdávěcí a oběžné lopatky plynových turbín, pecní systémy	Systémy MCrAlY, NiCr,
Atmosférická koroze	ocelové konstrukce, případně jiné díly vystavené atmosférické korozi	Al, Zn, Zn/Al, nerezavějící ocel
Chemická koroze	těsnící a ucpávkové plochy chemických zařízení	Cr ₂ O ₃ , Al ₂ O ₃ ,
Elektrická vodivost	keramické izolátory	Cu, CuSn10
Elektrická izolace	izolátory, kondenzátory	Al ₂ O ₃ ,
Těsnící obrušující se povlaky	labyrinty břitových těsnění parních a spalovacích turbín	Ni-grafit, AlSi-polyester
Biologické povlaky	endoprotézy, dentální implantáty	Ti, hydroxylapatit, fluorapatit

2.2. Navařování

Navařování není jen opravárenskou technologií. Je to moderní technologický postup, který umožňuje hospodárnou výrobu trvanlivých a provozně spolehlivých součástí pro nejrůznější strojní zařízení.

Základem je navařování ocelí nebo slitin se zvláštními vlastnostmi (jako je např. odolnost proti otěru) na pracovní hrany a plochy strojních součástí vystavených silnému opotřebení. Z technologického hlediska bude metoda navařování určena strojním vybavením, velikostí a tvarem dílu, resp. velikostí a tvarem navařované plochy, požadovanou výškou návaru, možností strojního obrábění návaru, přístupností k navařovanému místu, druhem a tvarem přídavného materiálu, možností nebo nutností tepelného zpracování.

Pro procesy navařování lze upravit či přizpůsobit ty metody svařování, které mohou být využitelné jako vhodný zdroj tepla, zabezpečující ohřátí až na teplotu natavení povrchu základního materiálu a současně očišťují a udržují čistotu povrchu navařované součásti. Musí také zabezpečit natavení přídavného materiálu, podávaného ve formě drátu, pásky, trubičky, prášku či tyčinky a zajistit jeho přenos až na navařované místo, viz Obr. 5.

Přehled nejčastějších metod navařování:

- návary plamenem
- ruční návary elektrodami
- ruční a automatizované návary metodou WIG
- navařování pod tavidlem – drátem, páskou, dvěma páskami
- navařování elektrostruskové
- ruční a automatové návary metodou MIG – MAG
- návary plazmou s přídavným drátem, s přídavným práškem
- návary automatové metodou plazma – MIG
- elektrovibrační svařování s ochrannou kapalinou či ochranným plynem

- plátování výbuchem
- navařování difúzní

Tvar a provedení návaru musí respektovat technologii výroby a budoucí podmínky namáhání součásti. V případě opotřebení třením nemají menší a náhodné póry, ani struskové vměstky nebo trhlinky velký vliv, neboť dochází pouze ke zvýšení úběru materiálu. Pro návary určené např. drapáky, rypadla apod. není tedy zapotřebí vynakládat tak velkou péči ani při přípravě návarové plochy, ani při navařování. Jinak je tomu v případech, když má návar přenášet také například kroutící moment - navařené hřídele kotevy elektromotorů. Zde je naprosto nutný návar bez uvedených vad, které by se projevovaly značnými vrubovými účinky a snižovaly tak únavovou pevnost celé konstrukce. Strukturní stejnorodost návaru lze v plné míře zajistit jedině tepelným zpracováním celého dílce po navaření.

Při opravách kavitačních poškozených povrchů (např. u vodních turbín, součástí čerpadel) je nutné velmi pečlivé navařování, aby návar byl homogenní a jeho povrch hladký. Přesné strojní součásti (např. ventily) vyžadují obzvlášť promyšlené a přesné přípravy návarové plochy a jejího dokonalého očištění, někdy dokonce i odmaštění před navařováním.

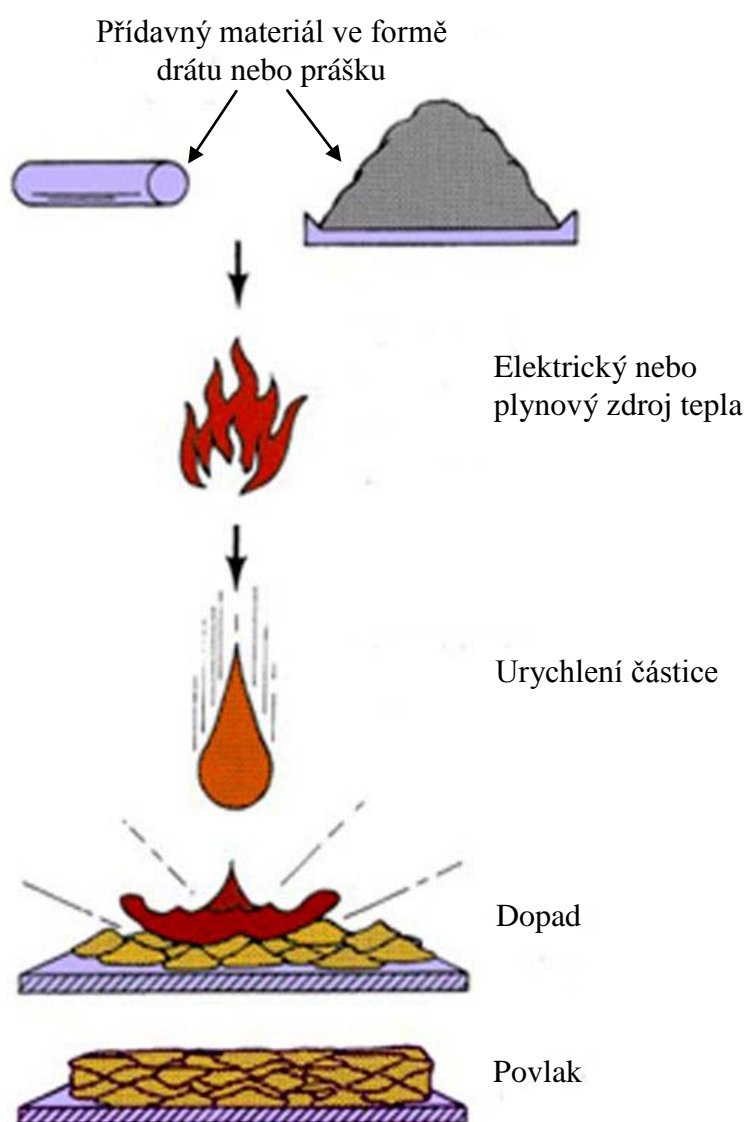


Obr. 5 – Porovnání návarů: ručně obalovanou elektrodou, drátem pod tavidlem, plazmatem [9]

3. Popis procesu tvorby žárových povlaků

Pro experiment popisovaný v další části této práce byla zvolena renovační technologie žárového nástřiku, proto bude pozornost dále věnována pouze této technologii.

Nanášený materiál je do zařízení přiváděn ve formě prášku nebo drátu, kde dojde k jeho natavení a urychlení ve směru povlakované součásti. Po dopadu na substrát dojde k výraznému plošnému rozprostření částice a k jejímu rychlému ztuhnutí. Tím se vytváří povlak s charakteristickou lamelární strukturou a specifickými vlastnostmi.



Obr. 6 – Princip vytváření žárových nástřiků

Vzhledem k samotné technologii nástřiku, kdy na plochu dopadají celé kapičky nataveného materiálu, má tato technologie řadu předností a velký rozsah přídavných materiálů. Proto lze pomocí technologie žárových nástřiků vytvářet povlaky z keramiky, kovů a jejich slitin na prakticky všechny typy materiálů substrátu. To je umožněno převážně mechanickým zakotvením povlaku na zdrsňeném povrchu substrátu. Technologický proces zaručuje teploty povlakované součásti hluboko pod teplotou fázově – strukturních přeměn (přibližně 80 – 120 °C), což také brání nežádoucím deformacím součásti.

3.1. Vstupní kontrola

3.1.1. Kontrola povrchu před nástřikem

- zjištění možného výskytu trhlin, prasklin, drážek a jiných defektů povrchu součásti
- zjištění zbytků stříkaných povlaků, nitridace, tvrdého chromování a jiných povrchových úprav

3.1.2. Kontrola rozměrů součásti

- porovnání skutečných rozměrů s rozměry výkresovými
- minimální rozměr pod nástřik musí být minimálně 0,1 mm na plochu pod konečnou čistou míru uvedenou na výkrese
- kontrola kuželovitosti, kvality a jiných odchylek od požadovaných rozměrů
- kontrola výběhu stříkaných ploch do sousedících ploch - stříkaná plocha musí být ukončena výběhy pod úhlem minimálně 30 °C od kolmice k povlakovanému povrchu

3.2. Čištění

- odmaštění stříkaného povrchu vhodnými prostředky

3.3. Krytování

- zakrytování ploch přímo sousedících se stříkanou plochou vhodnými prostředky, které vydrží přímé vystavení nástřiku (plechy, speciální pasty,

silikonová guma, apod.). Krytování nesmí zasahovat do stříkané plochy ani stínit nástřik povlakované plochy

- ostatní plochy stříkané součásti zakrytovat vhodnými prostředky (lepenky, pásy, nátěry, apod.)

3.4. Tryskání

- stříkané plochy otryskat vhodným tryskacím zařízením
- použít tryskací médium (korund, litinová drť, SiC, SiO₂, atd.) a parametry tryskání vhodné pro daný základní materiál
- ofouknutí tryskané plochy stlačeným vzduchem
- kontrola tryskaného povrchu na souvislost otryskání
- kontrola tryskaného povrchu na přítomnost zbytků tryskacího média - v případě výskytu zbytků tryskacího média je odstranit vhodnými prostředky
- kontrola krytování, zda nebylo poškozeno tryskáním
- otryskaná plocha nesmí být při další manipulaci před samotným nástřikem znečištěna
- samotný nástřik musí být zahájen v co nejkratší době po otryskání

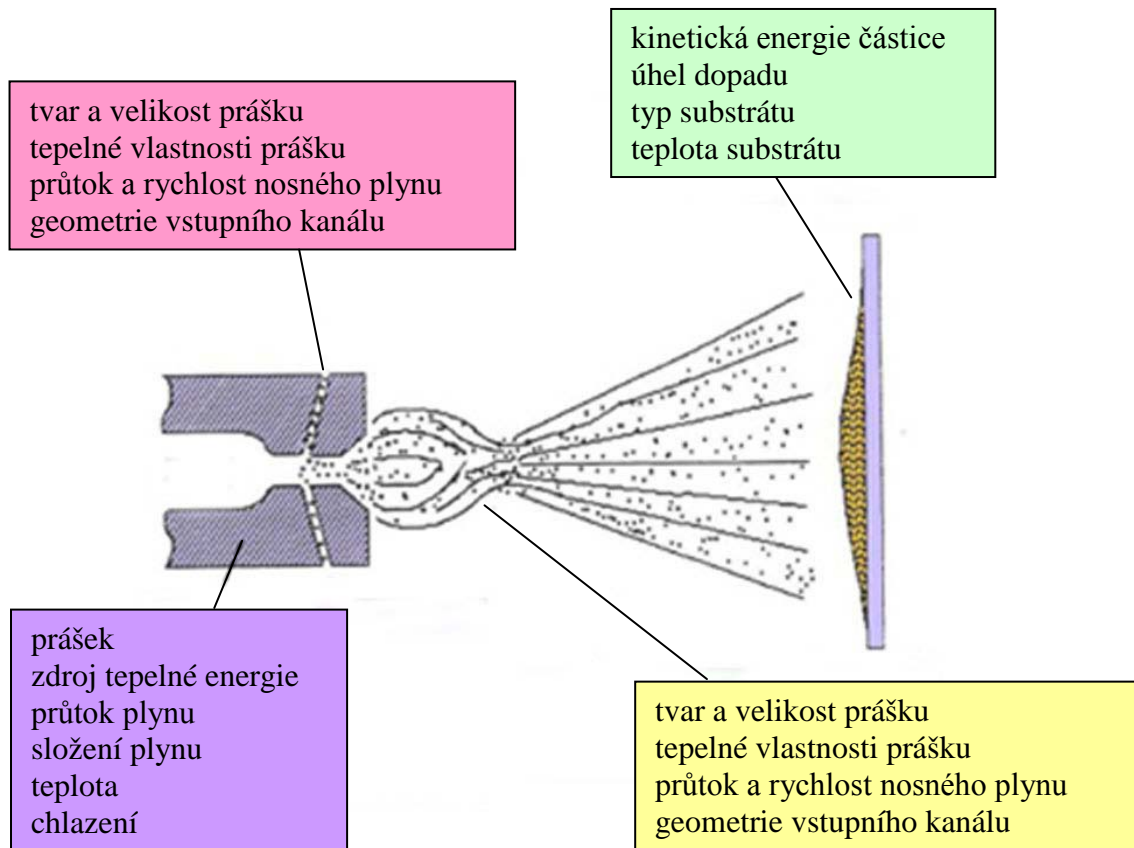
3.5. Nástřik

Po provedení všech úkonů (viz kapitoly 3.1. až 3.4.), nutných k úspěšnému nanesení povlaku lze provést samotný nástřik vhodně zvolenou technologií.

3.6. Parametry ovlivňující kvalitu povlaku

Hlavní parametry, které ovlivňují kvalitu povlaku jsou znázorněny na Obr. 7. Mezi parametry přímo ovlivňující kvalitu výsledného povlaku patří teplota a rychlost částic. Rychlost částice ovlivňuje její kinetickou energii a s tím související dopad na substrát. Čím je vyšší, tím dojde k větší plastické deformaci částice a lepšímu ukotvení k podkladu. Teplota a čas strávený v plameni je pak důležitý k protavení částice a s tím související

kvalitou povlaku (hustota a výskyt nenatavených nebo částečně natavených částic). Ovlivňují také míru oxidace a dekarbonizace částic během letu.

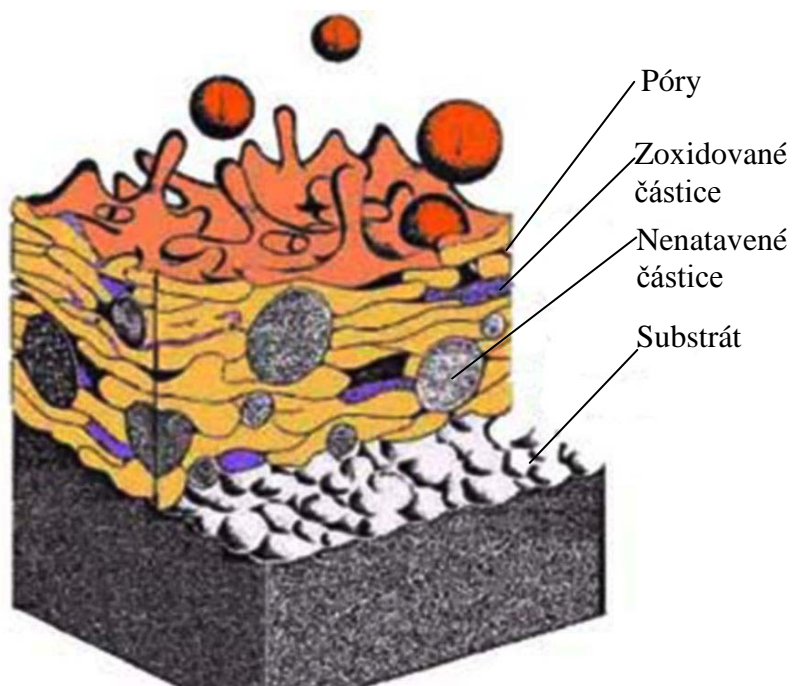


Obr. 7 – Hlavní parametry procesu [1]

Samotný povlak, jak ukazuje Obr. 8 má pak díky použité technologii lamerární strukturu, tvořenou jednotlivými deformovanými částicemi (tzv. splat) nenatavenými nebo jen částečně natavenými částicemi, póry a oxidickými částicemi. Jednotlivé části v povlaku lze pak ovlivnit vhodně zvolenou technologií žárových postřiků. Mezi nejvíce sledované hodnoty u kvality povlaků patří sledování porezity a obsah zoxidovaných částic, snahou je pak dosáhnout co nejvíce homogenní struktury. Další důležité vlastnosti, jež se u povlaků sledují, jsou pak shrnuty v následujících bodech:

- Adheze povlaku k substrátu
- Pevnost povlaku

- Tvrdost
- Odolnost proti korozi/oxidaci
- Tepelné vlastnosti
- Elektrické vlastnosti
- Magneto-optické vlastnosti
- Obrobitelnost



Obr. 8 – Struktura žárového nástřiku [1]

3.7. Typy žárových nástřiků

3.7.1. Nástřik prášku bez přetavení

Tento nástřik je určen pro železné, niklové a kobaltové materiály, lehké kovy, měď a slitiny zinku. Použití nachází zejména pro kluzná ložiska, čepy, těsnící plochy. Materiál je předeřhán na teplotu vyšší než 50 °C. Samotný ohřev povrchu dílu je 100 – 250 °C. Nástřik vrstvy je od 0,5 do 5 mm.

Tabulka 2 – Příklad složení a použití prášku pro nástřik bez přetavení [4]

Typ	Chemická analýzy	Tvrдость	Použití
EB 2007	C 0,02 Cr 17,0 Mo 2,20 Si 0,70 Ni 12,5 Fe zákl.	180 HB	Korozivzdorné návary např. pouzder, hřídelí, čerpadel a dalších dílů v chemickém a petrochemickém průmyslu.

3.7.2. Nástřik prášku s přetavením

Používá se převážně pro měděné a niklové slitiny, nelegované a legované oceli, litiny a ocelolitiny, pro vrstvy odolné tlakům na plochu, otěru, teplotnímu zatížení, korozi. Materiál je předehřán na teplotu 60 – 300 °C, tavící teplota je v rozmezí 1 050 – 1 100 °C. Provádí se předpráškování (ochrana proti oxidaci) a nástřik bezpórové vrstvy o tloušťce do 8 mm.

Tabulka 3 – Příklad složení a použití prášku pro nástřik s přetavením [4]

Typ	Chemická analýzy	Tvrдость	Použití
HA 032	Cu 89,0 Sn 11,0	140 - 190 HB	Zejména pro kluzná uložení a plochy, nástřiky odolné atmosférickým vlivům, vhodný i pro nástřik na neželezné kovy.

3.7.3. Nástřik keramických prášků

Vhodný nástřik zejména pro povlakování ploch namáhaných vysokou teplotou, dále elektroizolační nástřiky, nástřiky proti otěru. Životnost upravených dílů se zvýší 5 až 20 násobně, než u součástky upravené jinou klasickou metodou (např. chromování).

Tabulka 4 – Příklad složení a použití pro nástřik keramických prášků [4]

Typ	Chemická analýzy	Tvrдость	Použití
MX 6-3017.2	Al ₂ O ₃ 87,0 TiO ₂ 13,0	1000 HV	Tvrde houževnaté keramické vrstvy s dobrou těsností, opracovatelné leštěním nebo broušením. Pro textilní průmysl, vedení vláken, hřídele, části čerpadel.

3.7.4. Nástřik plastových prášků

Tento způsob se používá zejména pro dlouhodobou ochranu kovových ploch podléhajících korozi. Je odolný proti znečištění, atmosférické korozi, vlhkosti a mořskému prostředí.

Tabulka 5 – Příklad složení a použití pro nástřik plastových prášků [4]

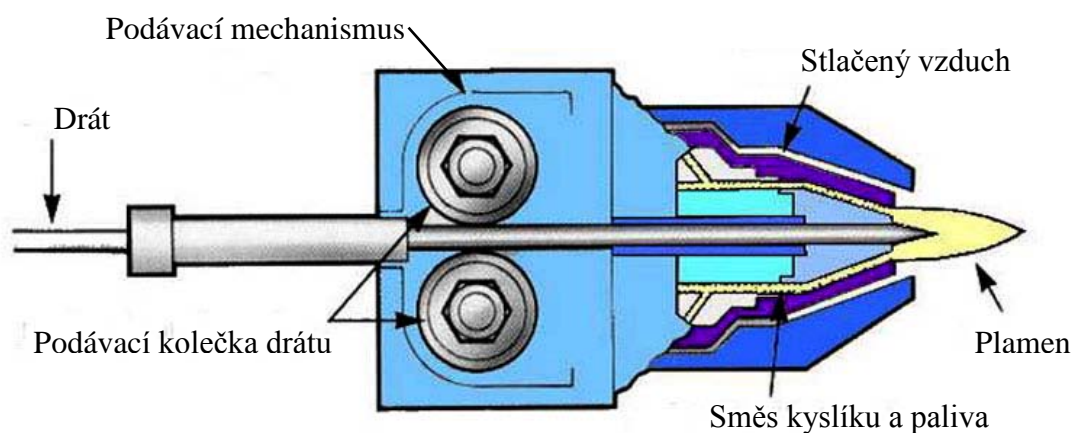
Typ	Chemická analýza	Tvrdość	Použití
PS 8-7001	Thermoplast - Polyamid	75 Shore D	Prášek pro vrstvy odolné atmosférickým vlivům a řadě chemických sloučenin. Odolnost tlaku, rázům, elektrická izolace.

3.8. Metody žárového nástřiku

Podle zdroje tepelné energie potřebné k natavení přídavného materiálu lze základní rozdělit druhy žárového nástřiku do následujících skupin:

3.8.1. Tepelná energie hoření směsi paliva a kyslíku

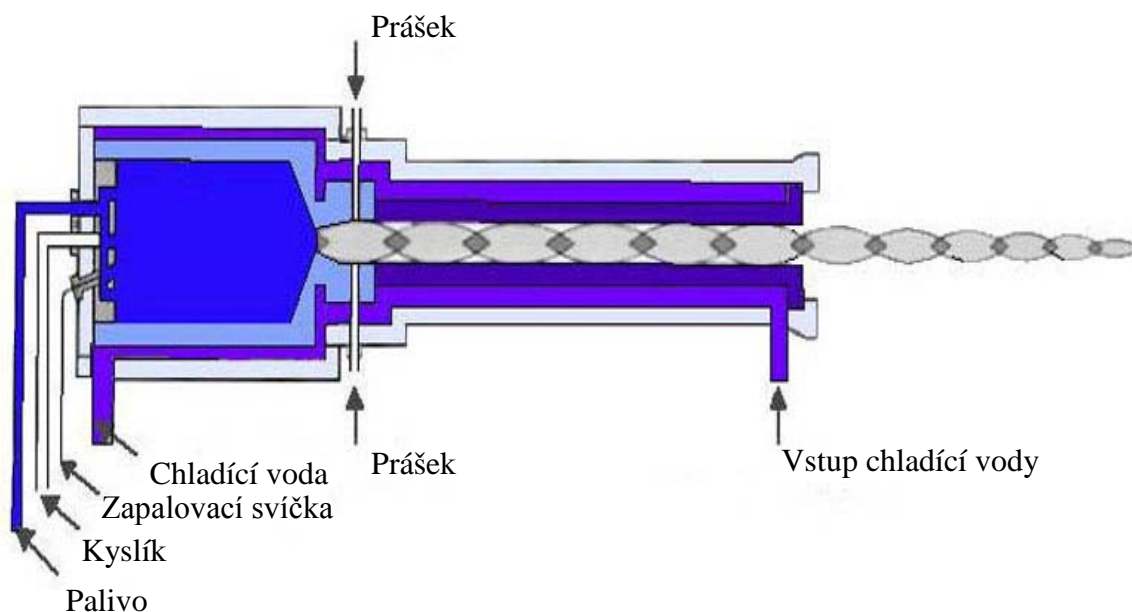
Nástřik plamenem – tato metoda používá stlačený vzduch nebo kyslík společně s palivem. Tento proces vytváří povlaky o nižší kvalitě. Důvodem je nízká dopadová hustota a nízká teplota plamene. Výhodou jsou nízké pořizovací i provozní náklady.



Obr. 9 – Schéma trysky plamenového hořáku [5]

Detonační nástřík – u tohoto procesu jsou směřovány acetylen a kyslík jako reakční plyny s dusíkem jako transportním plynem a s nanášeným materiálem a zapálením přivedeny k detonaci. Vzniklá exploze ohřívá a současně urychluje částice prášku hrdlem hořáku. Výhodou je vyšší rychlost částic a tím menší poréznost vrstvy a vyšší přilnavost.

Vysokorychlostní nástřík (HVOF – High Velocity Oxygen Fuel) - tato metoda je založena na speciálním designu hořáku, kde dochází k hoření směsi kyslík-palivo (kerosin, propylen, propan, acetylen, vodík) a spaliny jsou dále urychleny v konvergentně-divergentní trysce na supersonické hodnoty (až Mach 3). Materiál ve formě prášku je za pomoci nosného plynu přiváděn do supersonického plamene, kde dojde k jeho natavení a výraznému urychlení (až $1000 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$) směrem k povlakované součásti. Vysoká rychlost částic odvíjí vysoká hustota a přilnavost HVOF stříkaných povlaků.



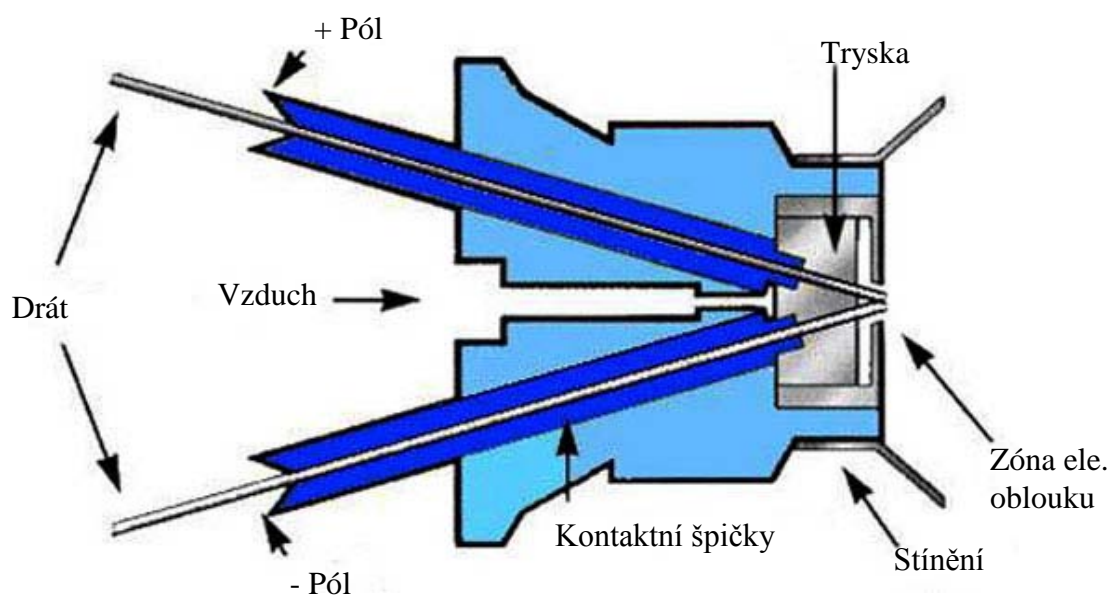
Obr. 10 – Schéma trysky HVOF nástříku [5]

3.8.2. Tepelná energie elektrického zdroje

Plazmatický nástřík - Při plazmatickém nástříku 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 s několika procenty plynu zvyšujícího entalpii plazmatu, např. H_2 ,

He, N₂). 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. 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.

Nástřik elektrickým obloukem - Tato metoda používá přídavný materiál ve formě dvou drátů, mezi jejichž konci hoří elektrický oblouk. Takto vzniklá tavenina je rozprašována stlačeným plynem, obvykle vzduchem. Tím se vytvoří proud roztavených kapiček nanášeného materiálu dopadajících na povrch povlakované součásti. Výhodou je jednoduchost, nízké provozní náklady a mobilita.

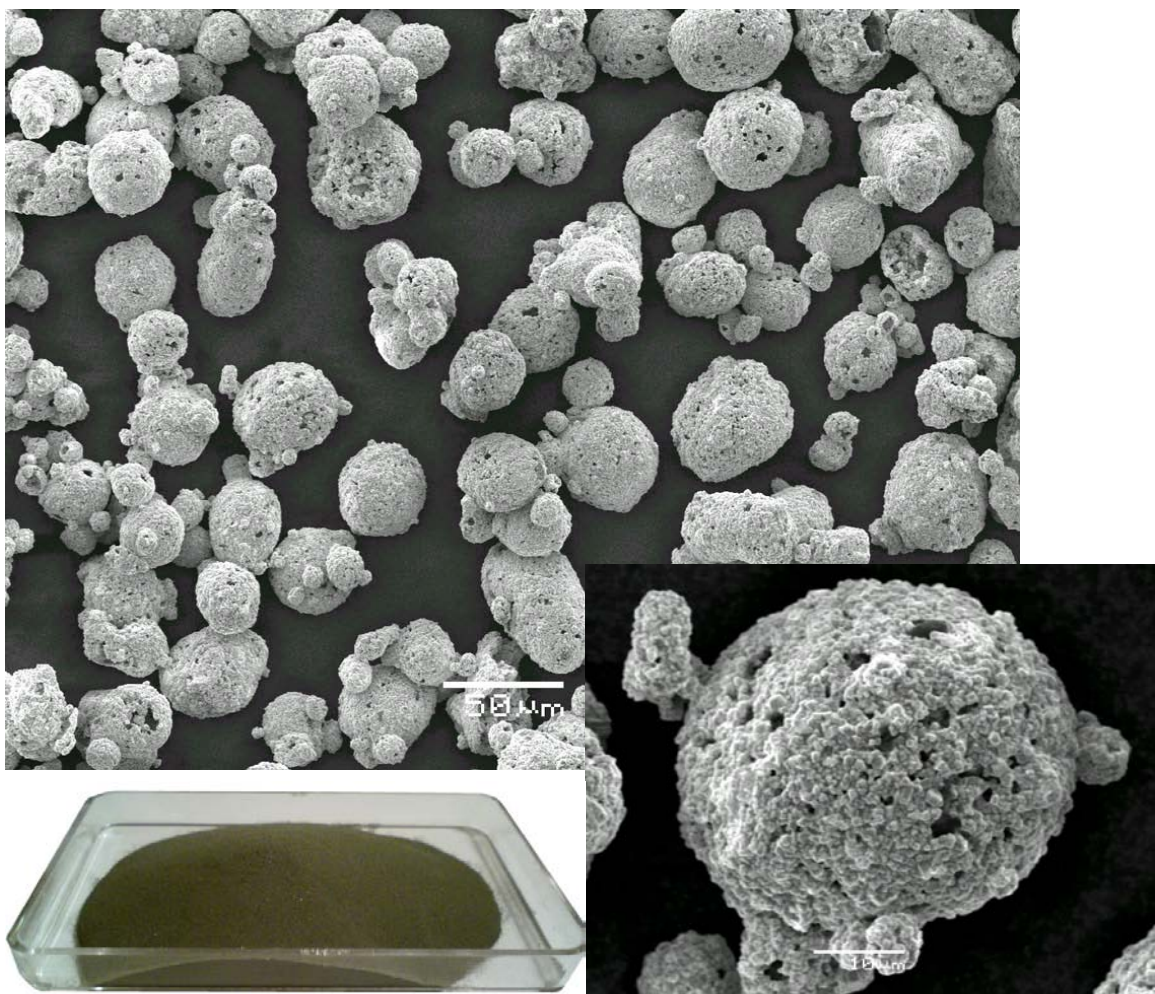


Obr. 11 – Schéma trysky nástřiku elektrickým obloukem [5]

4. Analýza povlaku

Jako substrát byl použit pás ocele třídy 11. Jedná se o konstrukční nelegovanou ocel, s předepsanými hodnotami mechanických vlastností a předepsaným obsahem uhlíku, fosforu, síry, případně i dalších prvků. U silničních vozidel tento materiál může reprezentovat některé namáhané ocelové a litinové díly z prostoru motoru. Na tento substrát byl nanesen prášek (Obr. 12) na bázi wolfram-karbidu s přídavkem niklu:

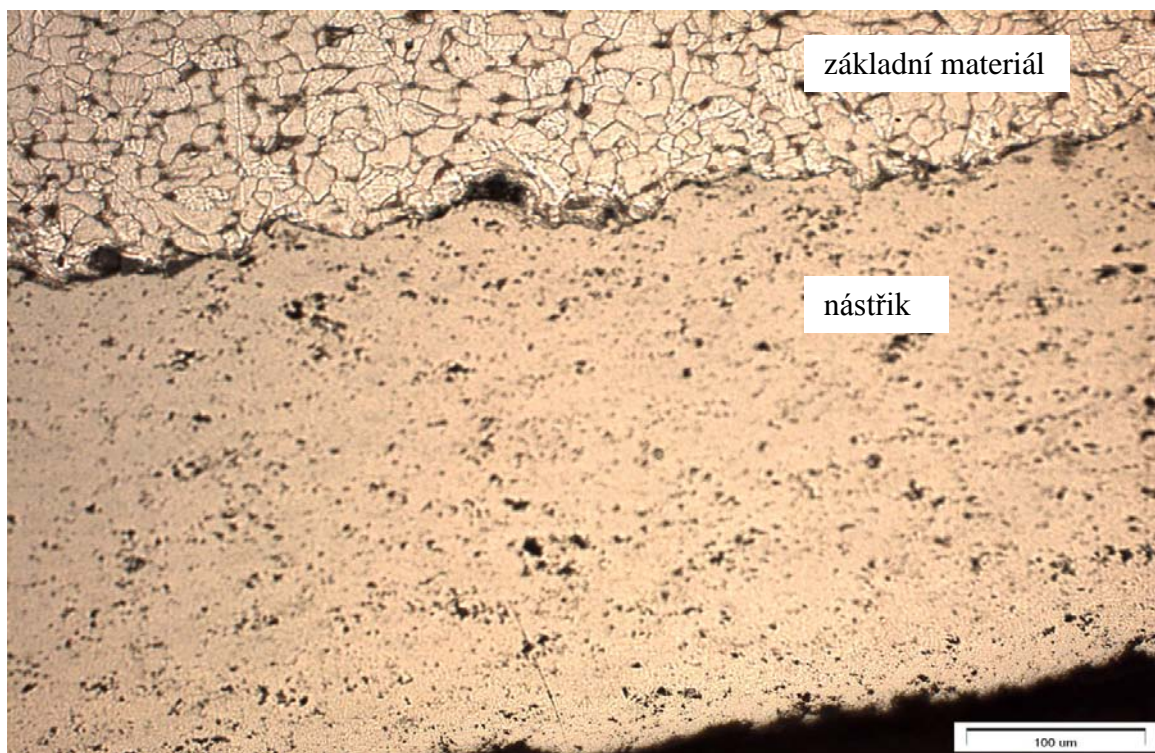
- celkový obsah uhlíku – 5,75%
- obsah volného uhlíku – 0,52%
- nikl – 11,98%
- wolfram – základ (zbytek do 100%)



Obr. 12 – Jednotlivé částice použitého prášku (elektronový rastrovací mikroskop)

Po nanesení povlaku vytváří uhlík s wolframem karbid, což je velmi tvrdá chemická sloučenina. Nikl pak zvyšuje houževnatost výsledného nástřiku.

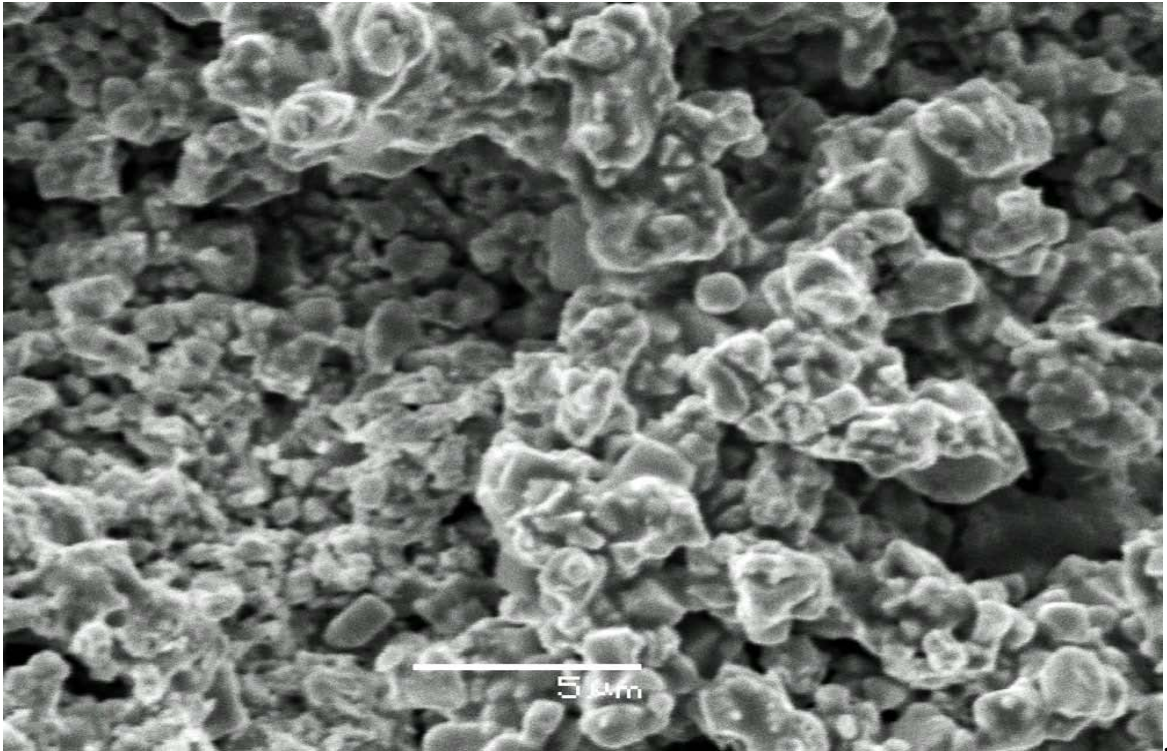
Z povlakovaných vzorků byly provedeny metalografické výbrusy, které dokládají vazbu mezi naneseným povlakem a základním materiálem, viz Obr. 13. Na mikrosnímku je zachyceno rozhraní mezi základním materiálem a nástřikem.



Obr. 13 – Řez rozhraním mezi substrátem a povlakem

Povlak vykazuje viditelnou úroveň porozity (Obr. 14), která se pohybuje v obvyklých mezích. Povrch substrátu je deformován, patrně v důsledku pískování. Přibližná tloušťka povlaku je 260 μm.

Obecně platí: pokud to složení dovoluje, je vhodné volit takový prášek, u něhož převažují neostrohranné, nebo kulaté částice. Ostrohranné částice totiž erodují trysky v hořáku při vyšších rychlostech, z čehož plyne nutnost časté výměny barelů a trysek.



Obr. 14 – Žárový nástřík – detail rozložení částic

U takto povrchově upraveného materiálu byly provedeny tři zkoušky, které měly prokázat přilnavost nástříku vůči základnímu materiálu, zvýšenou odolnost proti abrazivnímu opotřebení a možnost využití samomazné schopnosti v provozních podmínkách.

4.1. Bending (ohybový) test

Cílem je zjistit přilnavost naneseného povlaku s ohledem na možné porušení povrchových vrstev. Tato technologická zkouška spočívá v ohnutí vzorku přes kulatinu (trn).

4.1.1. Vyhodnocení

Jednalo se pouze o kvalitativní zkoušku, která ovšem jasně prokázala, jak i při velké plastické deformaci (ohyb v úhlu 180°) takto testovaného vzorku s nanesenou vrstvou, nedochází k porušení adhezních sil mezi povlakem a základním materiálem.



Obr. 15 – Výsledek ohybového testu

Podle očekávání byl při vyšších úhlech ohybu postupně pozorován vznik trhlin v povlaku, které jsou kolmé ke směru ohybu, iniciovaných vlivem značných tahových složek napětí. Na přiloženém obrázku Obr. 15 je zřejmá síť těchto rovnoběžných trhlin napříč nanesenou vrstvou, jež ovšem i nadále plně ulpívá na substrátu a svědčí o vynikajících vlastnostech toho povlaku.

4.2. Zkouška abrazivního opotřebení

Při tomto testu byla zjišťována odolnost proti abrazivnímu opotřebení u vzorku bez nástřiku a s nástřikem. Vzorek byl ukotven do upínací hlavice metalografické brusky a přitlačován k rovnoměrně se otáčející vodorovné desce, na které bylo připevněno brusné plátno. Byl posuzován jak vizuální projev opotřebení, tak hmotnostní úbytek materiálu.

Vstupní parametry:

- otáčky – $450 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$
- přitlačná síla – 15 N

4.2.1. Vyhodnocení

Byla provedena dvě měření, a to se vzorkem zalitým na výšku a na plocho.

Měření 1 (vzorek zalitý na výšku):

- hmotnost vzorku bez nástřiku – 26,1 g
- hmotnost vzorku s nástřikem – 25,4 g

Tabulka 6 – Naměřené hodnoty prvního měření

Na výšku	starý kotouč		nový kotouč	
	vzorek bez povlaku [g]	vzorek s povlakem [g]	vzorek bez povlaku [g]	vzorek s povlakem [g]
doba broušení 1 min	25,8	25,2	25,4	24,9
doba broušení 5 min	24,9	24,5	24,1	23,8

Měření 2 (vzorek zalitý na plocho):

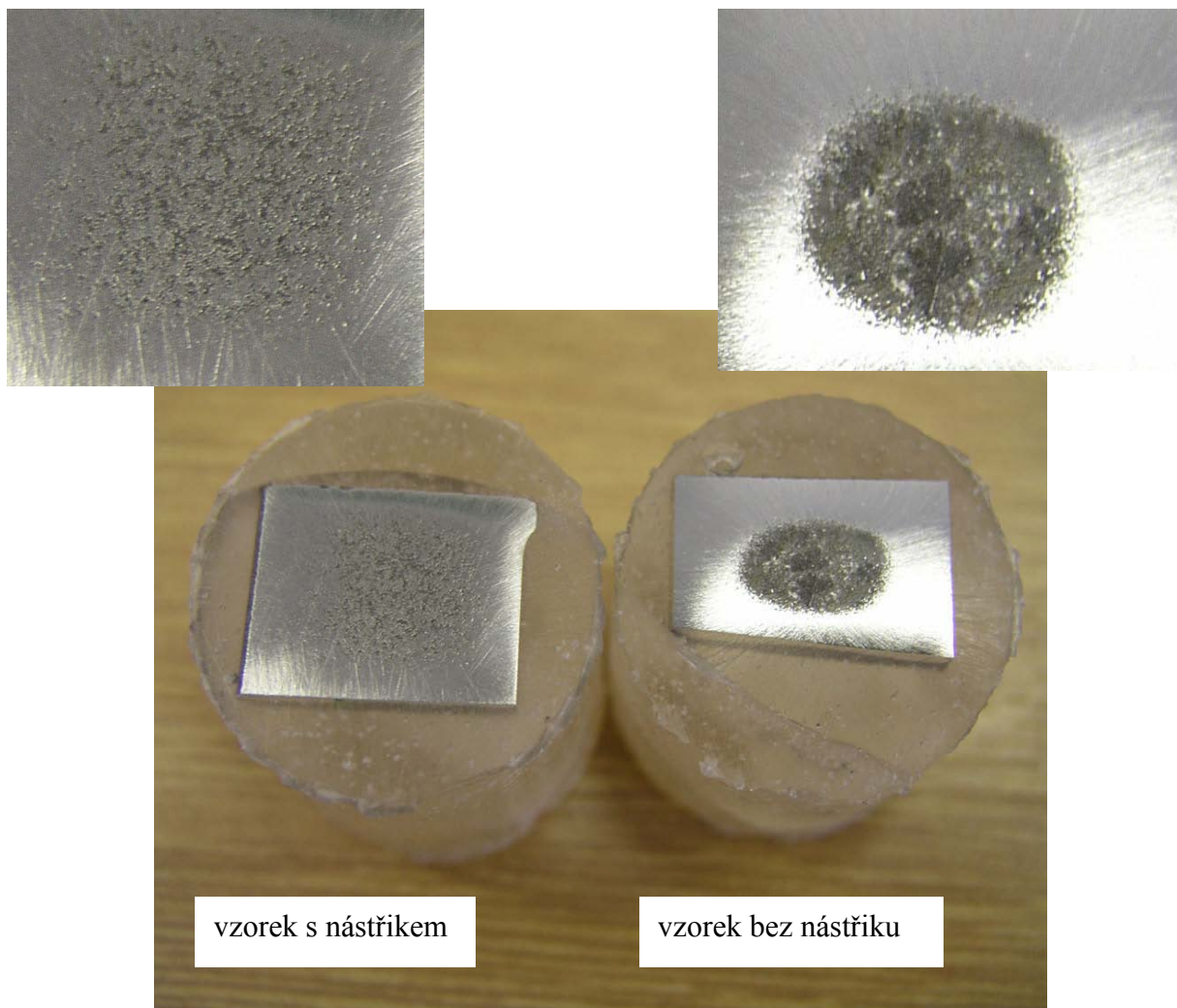
- hmotnost vzorku bez nástřiku – 25,1 g
- hmotnost vzorku s nástřikem – 27,5 g

Tabulka 7 – Naměřené hodnoty druhého měření

Na plocho	nový kotouč	
	vzorek bez povlaku [g]	vzorek s povlakem [g]
doba broušení 1 min	24,7	27,2
doba broušení 5 min	24,6	27,2

Tabulka 6 a Tabulka 7 uvádí, že téměř u všech testů, ať již byly provedeny starým, nebo novým brusným kotoučem, došlo u povlakovaného materiálu k menšímu úbytku (0,1 g).

Jak je patrné z Obr. 16, také celková plocha byla u vzorku s žárovým nástřikem opotřebena rovnoměrněji.



Obr. 16 – Vizuální porovnání vzorků po zkoušce abrazivního opotřebení

4.3. Zkouška nasákavosti

Tato zkouška spočívala v ponoření vzorků do vybraných typů olejů po dobu 30 minut. Vzorky byly zváženy před ponořením a po vyjmutí a následně porovnán jejich hmotnostní přírůstek (nasákavost).

Měření hmotnosti probíhalo na laboratorní váze LB - 1050/2.

4.3.1. Vyhodnocení

Použité typy olejů:

1. SHELL HELIX ULTRA 5W 40 – současné dieslové i benzínové motory
2. CASTROL SLX LONGLIVE 5W 30 – současné dieslové i benzínové motory
3. M7AD – staří typy benzínových a nepřepřítovaných naftových motorů
4. OTH P3 – hydraulický olej pro stavební stroje, vysokozdvížné vozíky apod.
5. H46 EXXO NUTO – užitý – hydraulický olej pro průmyslové stroje, čerpadla apod.

Tabulka 8 – Naměřené hodnoty při zkoušce nasákavosti

Typ oleje	1	2	3	4	5
Hrubé měření	39,7	39,6	35,2	33,5	34,5
Přesné měření před	39,879	39,560	35,380	33,566	34,657
Přesné měření po	39,893	39,670	35,391	33,578	34,667
Rozdíl	0,014	0,110	0,011	0,012	0,010

Zkouška potvrdila původní představu, že nástřiky splňují požadavek samomaznosti, ovšem s přihlédnutím k viskozitě použitého oleje – největší nasákavost byla zjištěna u oleje z nejnižší viskozitou. Tento závěr odpovídá zjištěné úrovni porozity povlaku, viz Obr. 13.

5. Závěr

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

Ve většině případů již dnes nedostačují dosavadní klasické technologie a technologické postupy, a proto se přistupuje k novým metodám. Jednou z vhodných možností řešení je využití technologie žárového nástřiku, kterou se zabývá i tato práce.

Použití renovačních metod umožňuje zvýšení spolehlivosti a výkonu zařízení. Dalším důležitým faktorem jsou ekonomické úspory, nejen v oblasti náhradních dílů, ale také ve výrazném snížení nákladů na údržbu a opravy.

Pro vyhodnocení testovaných vzorků byla posouzena mikrostruktury, a provedeny zkoušky mechanických a technologických vlastností žárového nástřiku. Bylo zjištěno zvýšení odolnosti proti abrazivnímu opotřebení, vynikající přilnavost vytvořeného povlaku vůči základnímu materiálu a částečná samomazná schopnost těchto nástřiků v prostředí olejů s vhodnou viskozitou.

Provedená rešerše a prezentované rozborů prokázaly vhodnost použití technologie žárových nástřiků v oblasti silničních vozidel - nejen u namáhaných strojních dílů motoru, jako jsou čepy, ojnice, kliková hřídel či pístní kroužky, ale také v oblasti podvozku.

Tato technologie je vhodná zejména u rozměrných součástí vystavených abrazivnímu opotřebení, jejichž výměna za nový díl by byla ekonomicky i provozně náročnější.

6. Literatura

- [1] HOUDKOVÁ ŠIMŮNKOVÁ, Š.; ENŽL, R.; BLÁHOVÁ, O.. *Žárové nástřiky* [online]. 2003 [cit. 2010-04-20]. Interakce povrchů s okolím. Dostupné z WWW: <http://www.kmm.zcu.cz/CD/content/2.html>
- [2] POŠTA, J.. *Technika* [online]. 2000 [cit. 2010-04-20]. Opatřebení. Dostupné z WWW: <http://www.gsxr.wz.cz/opotreb.htm>
- [3] FAMFULÍK, J.; MÍKOVÁ, J., KRYŽANEK, R. *Teorie údržby* [online]. Ostrava : Ediční středisko VŠB - TUO, 2007 [cit. 20.4.2010]. Opatřebení strojních soustav a vznik poruch, s. . Dostupné z WWW: <http://www.elearn.vsb.cz/archivcd/FS/TU/TU/4kapitola.pdf>
- [4] *Žárové nástřiky*. Reklamní materiál firmy Bohler Uddeholm CZ, s.r.o., Praha [cit. 2010-05-11]. Dostupné z WWW: http://www.bohler-uddeholm.cz/czech/files/zarove_nastriky.pdf
- [5] ŠKODA VÝZKUM, s.r.o. [online]. 1999 [cit. 2010-05-12]. *Žárové nástřiky*. Dostupné z WWW: http://skodavyzkum.cz/zarove_nastriky/technologie.php
- [6] Svařák.cz [online]. 22.10.2005 [cit. 2010-05-15]. *Aplikace technologie žárového nástřiku v oblasti oprav a renovací a možnosti uplatnění ve sklárství*. Dostupné z www: <http://www.svarak.cz/c/cz-2/aplikace-technologie-zaroveho-nastriku-v-oblasti-oprav-a-renovaci-a-moznosti-uplatneni-ve-sklarstvi.htm>
- [7] Firemní materiály společnosti DTD Future s.r.o.
- [8] SUCHÁNEK, J.; ZDRAVECKÁ, E. *Vliv otěruvzdorných vrstev a povlaků ocelí - 1*. 18. 02. 2003, 2, s. 3.
- [9] *Nekonvenční technologie svařování: Navařování, navařování metodou PTA.*, 2009. s. 33.

7. Seznam obrázků

Obr. 1 – Rozdělení opotřebení dle Burakowskeho [1].....	10
Obr. 2 – Mechanismy abrazivního opotřebení [1].....	12
Obr. 3 – Vliv úhlu dopadu erodentu na míru opotřebení [1].....	13
Obr. 4 – Příklad žárového nástřiku na čepu [1].....	16
Obr. 5 – Porovnání návarů – ručně obalovanou elektrodou), drátem pod tavidlem, plazmatem) [9].....	19
Obr. 6 – Princip vytváření žárových nástřiků.....	20
Obr. 7 – Hlavní parametry procesu [1].....	23
Obr. 8 – Struktura žárového nástřiku [1].....	24
Obr. 9 – Schéma trysky plamenového hořáku [5].....	26
Obr. 10 – Schéma trysky HVOF nástřiku [5].....	27
Obr. 11 – Schéma trysky nástřiku elektrickým obloukem [5].....	28
Obr. 12 – Jednotlivé částice použitého prášku (elektronový rastrovací mikroskop).....	29
Obr. 13 – Řez rozhraním mezi substrátem a povlakem.....	30
Obr. 14 – Žárový nástřik – detail rozložení částic.....	31
Obr. 15 – Výsledek ohybového testu.....	32
Obr. 16 – Vizuální porovnání vzorků po zkoušce abrazivního opotřebení	34

8. Seznam tabulek

Tabulka 1 – Příklady využití povlaků vytvořených technologií žárového nástřiku [6]	17
Tabulka 2 – Příklad složení a použití prášku pro nástřik bez přetavení [4]	25
Tabulka 3 – Příklad složení a použití prášku pro nástřik s přetavením [4]	25
Tabulka 4 – Příklad složení a použití pro nástřik keramických prášků [4]	25
Tabulka 5 – Příklad složení a použití pro nástřik plastových prášků [4]	26
Tabulka 6 – Naměřené hodnoty prvního měření	33
Tabulka 7 – Naměřené hodnoty druhého měření	33
Tabulka 8 – Naměřené hodnoty při zkoušce nasákavosti	35