

**SLOVENSKÁ POĽNOHOSPODÁRSKA UNIVERZITA
V NITRE
TECHNICKÁ FAKULTA**

2119641

DIPLOMOVÁ PRÁCA

2010

Bc. Juraj Hamar

SLOVENSKÁ POĽNOHOSPODÁRSKA UNIVERZITA
V NITRE
TECHNICKÁ FAKULTA

VPLYV PRETAVENIA NA TRIBOLOGICKÉ VLASTNOSTI
TVRDONÁVAROV

Diplomová práca

Študijný program:	Spoľahlivosť a bezpečnosť technických systémov
Študijný odbor:	5. 2. 57 Kvalita produkcie
Školiace pracovisko:	Katedra kvality a strojárskych technológií
Školiteľ:	Rastislav Mikuš, Ing.
Konzultant:	

Nitra, 2010

Bc. Juraj Hamar

Čestné vyhlásenie

Podpísaný Bc. Juraj Hamar vyhlasujem, že som záverečnú prácu na tému „Vplyv pretavenia na tribologické vlastnosti tvrdonávarov“ vypracoval samostatne s použitím uvedenej literatúry.

Som si vedomý zákonných dôsledkov v prípade, ak uvedené údaje nie sú pravdivé.

V Nitre 28. apríla 2010

Bc. Juraj Hamar

Touto cestou si dovoľujem poďakovať vedúcemu mojej diplomovej práce Ing. Rastislavovi Mikušovi za jeho vecné pripomienky a odborné vedenie pri vypracovaní diplomovej práce.

Abstrakt (v štátnom jazyku)

Cieľom práce bolo zistiť vplyv pretavenia na pomernú odolnosť proti abrazívnemu opotrebeniu vybraných druhov práškových tvrdonávarových materiálov. Ide o samotroskotvorné práškové prídavné materiály na báze NiCrBSi. Merania boli vykonané na zariadení pre skúšky odolnosti materiálov proti abrazívnemu opotrebeniu na brúsnom plátne podľa normy STN 015084. Najvyššiu hodnotu pomernej odolnosti proti abrazívnemu opotrebeniu dosiahol materiál NP 62, pričom nebol pozorovaný výrazný vplyv pretavenia na dosiahnuté hodnoty. Najnižšie hodnoty pomernej odolnosti proti abrazívnemu opotrebeniu dosiahol materiál NP 52. U tohto materiálu sa najvýraznejšie prejavil pozitívny vplyv (nárast o 25 %) pretavenia na odolnosť proti abrazívnemu opotrebeniu.

Kľúčové slová: tribologické vlastnosti, odolnosť proti abrazívnemu opotrebeniu, skúšky opotrebenia, tvrdonávary, práškové prídavné materiály

Abstrakt (v cudzom jazyku)

Abstract

Work deals with determination of remelting influence on relative resistance against abrasive wear of selected hardfacing powder filler materials. There were self-fluxing powder filler materials on NiCrBSi basis observed. Measurements were performed on device for tests of metal materials against wear by abrasive cloth according to standard STN 015084. The highest value of relative resistance against abrasive wear was reached by material NP 62. There was not any influence of remelting on value of relative resistance against abrasive wear of NP 62 observed. The lowest value of relative resistance against abrasive wear was reached by material NP 52. There was positive influence (increasing about 25 %) of remelting on relative resistance against abrasive wear of NP 52 observed.

Key words: tribological properties, resistance against abrasive wear, wear tests, hardfacing materials, powder filler materials

Obsah

Obsah	6
Zoznam skratiek a značiek.....	8
Úvod	9
1 Súčasný stav riešenej problematiky doma a v zahraničí.....	10
1.1 Princíp žiarového striekania	10
1.1.1 Tvorba vrstvy pri žiarovom striekaní.....	10
1.1.2 Výhody a nevýhody žiarového striekania.....	12
1.2 Metódy žiarového striekania	13
1.2.1 Žiarové striekanie plameňom.....	14
1.2.1.1 Drôtové plameňové striekanie	15
1.2.1.2 Práškové plameňové striekanie.....	16
1.2.2 Detonačné žiarové striekanie	16
1.2.3 Vysokorýchlostné žiarové striekanie - HVOF	17
1.2.4 Žiarové striekanie elektrickým oblúkom	18
1.2.5 Žiarové striekanie plazmou.....	19
1.2.6 Indukčné žiarové striekanie	21
1.2.7 Žiarové striekanie laserom.....	21
1.3 Technologický postup žiarového striekania	22
1.3.1 Príprava povrchu základného materiálu pred žiarovým striekaním	23
1.3.1.1 Odmasťovanie povrchu.....	23
1.3.1.2 Abrazívne zdrsnenie povrchu	23
1.3.1.3 Mechanické obrobenie povrchu.....	24
1.3.1.4 Nanášanie medzivrstiev	24
1.3.2 Konečné úpravy nástrekov.....	25
1.4 Materiály na tvorbu povlakov žiarovým striekaním	26
1.4.1 Rozdelenie prídavných materiálov podľa chemického zloženia	26
1.4.1.1 Kovové prídavné materiály.....	26
1.4.1.2 Nekovové prídavné materiály.....	28
1.4.1.3 Kompozitné prídavné materiály.....	28
1.4.2 Rozdelenie prídavných materiálov podľa tvaru.....	29
1.4.2.1 Prídavné materiály v tvare drôtu.....	29

1.4.2.2	Prídavné materiály v tvare tyčky	30
1.4.2.3	Prídavné materiály v tvare prášku	30
1.5	Vlastnosti povlakov vytvorených žiarovým striekaním	30
1.5.1	Prilnavosť povlaku k podkladu (adhézia).....	30
1.5.2	Súdržnosť povlaku (kohézia).....	31
1.5.3	Pórovitosť povlaku.....	33
1.5.4	Tvrdosť povlaku.....	34
1.5.5	Lomová húževnatosť povlaku.....	34
1.5.6	Odolnosť proti opotrebeniu.....	34
2	Cieľ práce.....	36
3	Metodika práce.....	37
3.1	Výber a charakteristika skúmaných materiálov	37
3.2	Postup prípravy vzoriek.....	38
3.3	Postup merania a vyhodnocovania	39
3.3.1	Meranie tvrdosti.....	39
3.3.2	Meranie a vyhodnocovanie odolnosti proti abrazívnemu opotrebeniu.....	40
3.3.2.1	Zariadenie na skúšky odolnosti proti abrazívnemu opotrebeniu	40
3.3.2.2	Postup pri skúške odolnosti proti abrazívnemu opotrebeniu	41
3.3.2.3	Vyhodnotenie skúšky pomernej odolnosti proti abrazívnemu opotrebeniu	42
4	Výsledky práce	44
4.1	Určenie mernej hmotnosti skúšaných materiálov.....	44
4.2	Skúška odolnosti proti abrazívnemu opotrebeniu na brúsnom plátne.....	46
5	Diskusia	53
6	Návrh na využitie výsledkov	55
7	Záver.....	56
8	Použitá literatúra	58
9	Zoznam príloh	61

Zoznam skratiek a značiek

m	hmotnosť skúšobnej vzorky (g)
m_0	hmotnosť skúšobnej vzorky pred skúškou (g)
m_1	hmotnosť skúšobnej vzorky po skúške
HMSF	označenie naváracieho prášku od firmy Hoganas
HRC	tvrdosť podľa Rockwellovej stupnice C
HV	tvrdosť podľa Vickersa
HVOF	High Velocity OxyFuel (vysokorýchlostné žiarové striekanie)
NP	označenie naváracieho prášku od firmy VÚZ-PI
ΔV	priemerný objemový úbytok skúšobných telies zo skúšaného materiálu (g)
ΔV_E	priemerný objemový úbytok etalónových skúšobných telies (g)
ρ	merná hmotnosť skúšaného materiálu ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)
ρ_E	merná hmotnosť etalónového materiálu ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)
$\bar{\rho}$	priemerná hodnota mernej hmotnosti ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)
σ	smerodajná odchýlka ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$; g)
ψ_{abr}	pomerná odolnosť proti abrazívnemu opotrebeniu
$\Delta \bar{m}$	priemerný hmotnostný úbytok navarených skúšobných telies (g)
$\Delta \bar{m}_E$	priemerný hmotnostný úbytok etalónových skúšobných telies (g)

Úvod

Na obnovenie pôvodnej funkčnosti súčiastok, teda na doplnenie opotrebeného materiálu do pôvodných rozmerov a tvaru, sa používajú rôzne renovačné metódy. Tým sa, okrem obnovenia pôvodných tvarov a rozmerov súčiastok, dávajú súčiastkam nové vlastnosti, často lepšie, ako mali pôvodne.

V súčasnej dobe je v ponuke veľké množstvo rôznych prídavných materiálov, ktoré svojim chemickým a štruktúrnym zložením zabezpečujú zvýšenie odolnosti proti opotrebeniu po nanosení na súčiastku.

Aby mohli nanášané materiály odolné proti opotrebeniu plniť svoju funkciu, je potrebné použiť vhodnú technológiu ich nanosenia. Zavádzaním nových a zdokonaľovaním používaných technológií je možné zabezpečiť novú kvalitatívnu úroveň nanášaných vrstiev. To môže následne priniesť pozitívne zmeny smerujúce k úsporám materiálov a energií nielen v prevádzke, ale aj pri samotnej tvorbe opotrebeniu odolných vrstiev.

Jednou z mimoriadne rýchlo sa rozvíjajúcich technológií nanášania tvrdých a opotrebeniu odolných vrstiev je technológia žiarového striekania. Na dosiahnutie optimálnych kvalitatívnych parametrov vrstiev nanášaných žiarovým striekaním je potrebné vybrať vhodnú metódu nanášania. Vzhľadom na to, že tieto metódy sú stále vo vývoji, je potrebné neustále skúmať jednotlivé procesy ich technologického postupu s cieľom ich zdokonalenia a tým zvýšenia kvality nanášaných vrstiev. Jednou z takých možností je aj následné pretavenie vrstiev z práškových prídavných materiálov.

1 Súčasný stav riešenej problematiky doma a v zahraničí

1.1 Princíp žiarového striekania

Žiarové striekanie je proces nanosenia povlakov na povrch súčiastky pomocou vysokoteplotného prúdu, obsahujúceho natavené častice prášku alebo roztaveného kovu. Častice pohybujúce sa veľkou rýchlosťou sa pri náraze na povrch deformujú a vytvárajú špecifický povrch (Kolektív autorov, 2000).

Podľa Filipenského (2005) možno proces vytvárania povlakov technológiou žiarového striekania charakterizovať ako natavovanie prídavného materiálu (vo forme prášku, drôtu alebo tyčinky), pričom tieto natavené častice sú urýchľované a nanášané na povrch základného materiálu. Po dopade na základný materiál dochádza k čiastočnej alebo úplnej deformácii jednotlivých dopadajúcich častíc, ktoré postupne veľmi rýchlo tuhnu a vytvárajú heterogénnu štruktúru.

Ambrož a Kašpar (1990) definujú žiarové striekanie ako ohrev častíc nanášaného materiálu na teploty blízke teplote likvidu alebo nad teplotu likvidu, pričom základný materiál má spravidla teplotu okolia a v priebehu žiarového striekania nepresiahne teplota jeho povrchu 120 °C. Najčastejšie sa dosahuje mechanické spojenie povlaku so základným materiálom.

1.1.1 Tvorba vrstvy pri žiarovom striekaní

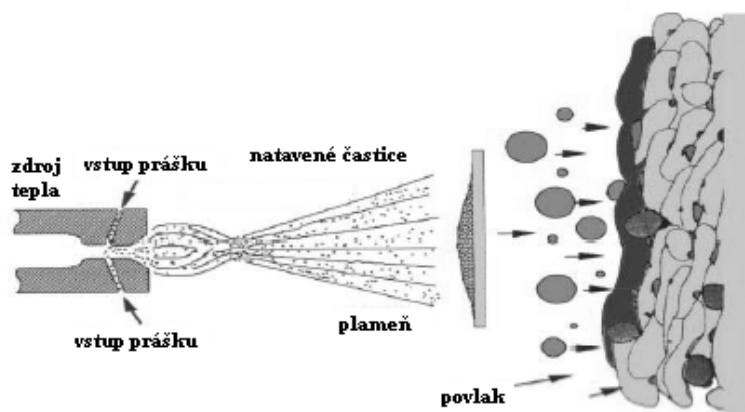
Z uvedených definícií žiarového striekania vyplýva, že podstatou všetkých metód používaných na tvorbu povlakov je prichytávanie častíc prídavného materiálu na vhodne upravenom povrchu základného materiálu (obr. 1). Celý proces žiarového striekania a vytvorenia nástreku možno rozdeliť na niekoľko fáz (Ambrož, Kašpar, 1990):

I. fáza – vstup nanášaného materiálu do zdroja energie, príp. formovanie častíc nanášaného materiálu z pôvodnej formy prídavného materiálu;

II. fáza – prelet nanášaných častíc od časového okamihu ich vzniku (alebo vstupu do zdroja energie) do časového okamihu ich nárazu na pripravený povrch základného materiálu;

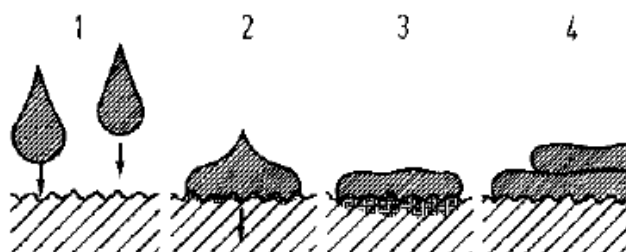
III. fáza – dopad častíc na povrch základného materiálu;

IV. fáza – ochladzovanie naneseného povlaku a mikrooblastí základného materiálu prislúchajúcich bezprostredne k povlaku.



Obr. 1 Schéma procesu tvorby žiarových nástrekov (Racková et al., 2007)

Roztavená častica sa pri dopade na základný materiál vplyvom svojej vysokej kinetickej energie intenzívne deformuje. Pri dopade v častici prebehne pružná deformácia a až pôsobením impulzného tlaku sa deformuje na povrch základného materiálu (obr. 2). Pritom každá častica podlieha termomechanickej práci spočívajúcej v ohreve častice, reakcii s plynmi pri vyšších teplotách, náraze, roztečení a stuhnutí (Kolektív autorov, 2000).

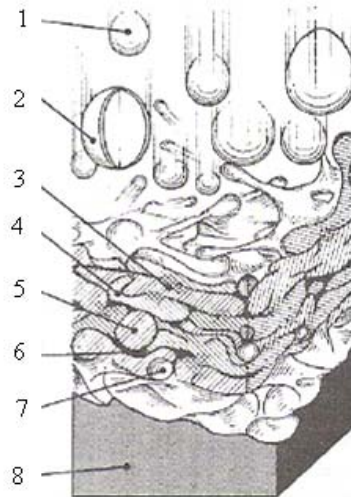


Obr. 2 Deformácia častice po dopade na povrch základného materiálu (Knotek, 2001)

1 – let tekutej častice, 2 – dopad častice, 3– prenos tepla z častice do povrchu základného materiálu, 4 – tuhnutie a vytváranie vrstiev

Z obr. 3 vyplýva, že vrstva vytvorená žiarovým striekaním je značne heterogénna a má charakter nepravidelných vrstiev uložených na sebe. Homogenitu vrstvy narušujú najmä póry, ktoré vznikajú nedokonalým vyplnením priestoru časticami. Póry môžu byť vyplnené vzduchom, alebo plynmi, ktoré sa zúčastňujú procesu striekania. Výrazným narušením štruktúrnej rovnorodosti povlakov sú oxidy, ktoré vznikajú na časticach počas fázy preletu, ako aj pri samotnom dopade na podklad. Pri veľkej vzdialenosti

striekania alebo pri nízkej teplote častíc môžu častice počas letu stuhnúť a na podklad dopadnú v tuhom stave. Takéto častice sa oveľa ťažšie deformujú a teda aj spájajú s podkladom.



Obr. 3 Schéma vzniku povlaku žiarovým striekaním (Wegner, 2004)

1 – letiaca častica, 2 – vrstva oxidov, 3 – mikrozvar častíc, 4 – mechanické ukotvenie častíc, 5 – častica stuhnúť počas letu, 6 – mikrodotina, 7 – mikropór, 8 – základný materiál

Pretože pri žiarovom striekaní dochádza k nízkemu ohrevu základného materiálu, väzby medzi povlakom a základným materiálom nie sú silné a pozostávajú zo síl mechanického ukotvenia, Van der Waalsových síl a síl vyvolaných chemickou väzbou (Veselko, Sudnik, 1990).

1.1.2 Výhody a nevýhody žiarového striekania

Žiarové striekanie je výrazne sa rozvíjajúcou technológiou, ktorá našla svoje uplatnenie v mnohých oblastiach hospodárstva, napr. v automobilovom priemysle, leteckom a vesmírnom priemysle, energetike, elektrotechnike, medicíne a pod.

Takéto široké možnosti použitia vyplývajú z nasledujúcich výhod žiarového striekania:

- možnosť nanášania širokého rozsahu materiálov – kovy, zliatiny, keramika a kompozity;
- možnosť aplikovať povlaky s pomerne veľkou hrúbkou pri vysokých rýchlostiach nanášania;

-
- mechanické spojenie povlaku s podkladom, tzn. možnosť nanášať povlaky, ktoré majú vyššiu teplotu tavenia, než základný materiál;
 - dosiahnutie požadovaných vlastností hneď po nanosení, takže ich nie je potrebné tepelne spracovávať;
 - minimálne tepelné ovplyvnenie základného materiálu, preto je minimálne riziko vzniku deformácií;
 - možnosť uskutočnenia relatívne rýchlej a lacnej renovácie súčiastky, pričom cena renovácie často dosahuje zlomok ceny novej súčiastky;
 - výrazné zvýšenie životnosti renovovaných súčiastok oproti pôvodným pri voľbe vhodného materiálu povlaku;
 - možnosť aplikácie povlakov ručne alebo automaticky.

K nevýhodám žiarového striekania, ktoré často obmedzujú jeho širšie použitie v praxi, patria:

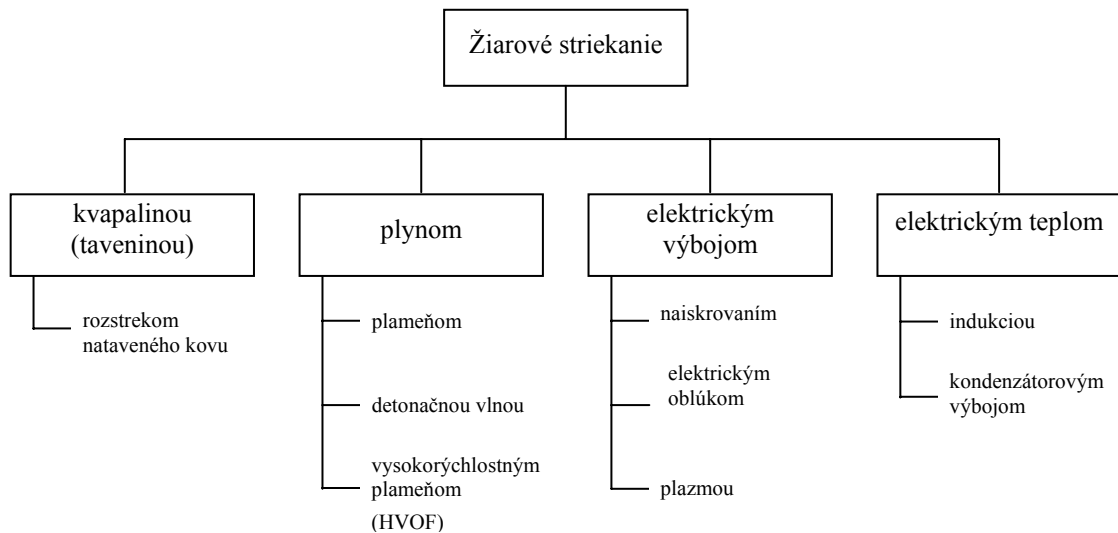
- mechanické spojenie povlaku s podkladom môže byť v niektorých prípadoch nevýhodou, najmä pri vyšších kontaktných tlakoch pri prevádzke súčiastky;
- nehomogénna štruktúra povlakov spôsobená pórmí, oxidmi a mechanickými spojmi medzi časticami tvoriacimi povlak;
- vysoké náklady na obstaranie zariadení pre žiarové striekanie, najmä u plazmy a HVOF;
- zdraviu škodlivá prevádzka technológií žiarového striekania (radiácia, hlučnosť).

1.2 Metódy žiarového striekania

Podľa Filipenského (2005) možno technológie žiarového striekania rozdeliť podľa použitej metódy ohrevu a transportu častíc prídavného materiálu nasledovne:

- žiarové striekanie plameňom, pri ktorom sa používajú prídavné materiály vo forme prášku, drôtu alebo tyčky;
- žiarové striekanie elektrickým oblúkom, pri ktorom sa používajú prídavné materiály vo forme drôtu alebo tyčky;
- žiarové striekanie plazmou, pri ktorom sa používajú prídavné materiály vo forme prášku;
- žiarové striekanie vysokorýchlostným kontinuálnym nanášaním, pri ktorom sa používajú prídavné materiály vo forme prášku.

Pretože pri žiarovom striekaní dochádza k premene a k využitiu určitého druhu energie na natavenie prídavného materiálu a čiastočne alebo úplne na jeho unášanie k upravenému povrchu základného materiálu, rozdeľujú Ambrož a Kašpar (1990) metódy žiarového striekania podľa použitej energie (obr. 4).



Obr. 4 Prehľad metód žiarového striekania (Ambrož, Kašpar, 1990)

Pre jednotlivé typy energie možno rozlíšiť určité charakteristické hodnoty a vlastnosti, ktoré tieto druhy energií jednoznačne odlišujú. Je to najmä maximálna dosahovaná hustota energie na jednotku plochy a maximálna dosahovaná teplota.

1.2.1 Žiarové striekanie plameňom

Pri tejto metóde žiarového striekania sa používa najčastejšie ako zdroj energie chemická reakcia horenia zmesi kyslíka a horľavého plynu. Ako horľavý plyn sa najčastejšie používa acetylén pre vysokú teplotu plameňa (až 3150 °C). Pri žiarovom striekaní plameňom sa aplikujú prídavné materiály buď vo forme drôtu (alebo tyčiek), alebo vo forme prášku.

Výstupná rýchlosť plameňa a jeho výstupná energia neumožňujú urýchlenie častíc nanášaného materiálu na také rýchlosti, ktoré by zaručovali dobré vlastnosti nanesených povlakov, najmä ich príľnavosť, preto býva na urýchľovanie častíc prídavného materiálu používaný stlačený vzduch pod tlakom 0,6 MPa (Ambrož, Kašpar, 1990).

Urýchľovanie častíc stlačeným vzduchom sa využíva hlavne pri prídavnom materiáli vo forme drôtu. Nevýhodou v tomto prípade je, že vzduch má na plameň silne oxidačný účinok a výrazne znižuje jeho teplotu. Z tohto poklesu vyplývajú obmedzenia

pre použitie ťažšie tavitelných materiálov na striekanie plameňom (Kolektív autorov, 2000).

Metóda žiarového striekania plameňom je veľmi jednoduchá a v praxi rozšírená. Z ekonomického hľadiska patrí medzi najvýhodnejšie metódy.

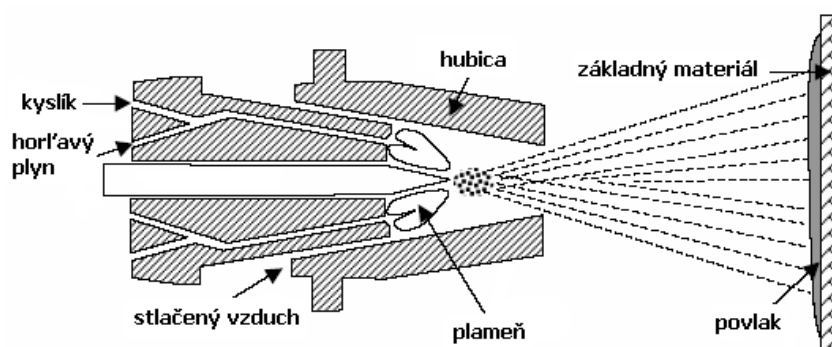
Vlastnosti povlakov nanesených plameňovým žiarovým striekaním možno ovplyvňovať nasledujúcimi technologickými parametrami (Ambrož, Kašpar, 1990):

- množstvom kyslíka,
- množstvom horľavého plynu,
- tlakom rozstrekovacieho vzduchu,
- vzdialenosťou striekania,
- množstvom nanášaného prídavného materiálu,
- tvarom a veľkosťou častíc prídavného materiálu.

1.2.1.1 Drôtové plameňové striekanie

Pri drôtovom plameňovom striekaní sa prídavný materiál (drôt) podáva podávacími kladkami poháňanými vzdušnou turbínkou alebo elektrickým motorčekom cez centrálny otvor horáka a roztavuje sa plameňom. Roztavený kúpeľ sa rozptýli na častice, ktoré sa urýchľujú stlačeným vzduchom (obr. 5). Častice dosahujú rýchlosť približne $100 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.

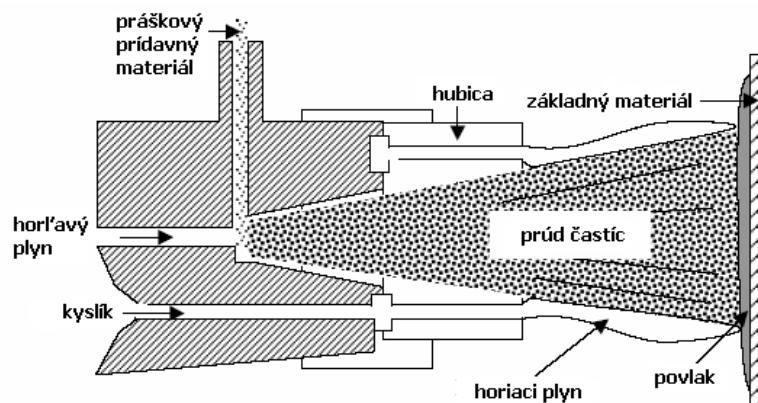
Horák má pomerne jednoduchú konštrukciu, je prevádzkovo spoľahlivý, citlivý na správne nastavenie tlakov a prietokov spaľovaných plynov a vzduchu, citlivý na čistotu vzduchu (Kolektív autorov, 2000).



Obr. 5 Schéma horáka na drôtové plameňové striekanie (Stokes, 2008)

1.2.1.2 Práškové plameňové striekanie

Pri práškovom plameňovom striekaní sa používajú dva typy striekacích zariadení. Prvým z nich je injektorové striekacie zariadenie (obr. 6). V ňom je prášok zo zásobníka strhávaný prúdom transportného plynu (kyslíka, dusíka, argónu alebo stlačeného vzduchu) do horáka cez regulovateľný otvor. Pohyb prášku uľahčuje vibrácia zásobníka. Prášok je vháňaný do spaľovacej zóny plameňa, ktorý obklopuje centrálny otvor dýzy horáka. Prášok je počas letu plameňom unášaný prúdom spálených plynov. Ak je transportným plynom kyslík, čiastočne sa horenia zúčastňuje, zvyšuje teplotu plameňa a tým aj teplotu a rýchlosť striekaných častíc (Kolektív autorov, 2000).



Obr. 6 Schéma horáka na práškové plameňové striekanie (Stokes, 2008)

Pri násypných striekacích zariadeniach sa striekaný prášok dopravuje zo štrbinového zásobníka priamo do redukčnej oblasti plameňa samospádom. Pri tomto spôsobe sa dosahuje nízka rýchlosť striekaných častíc (iba $30 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$). V súčasnosti sa používajú menej. Ich výhodou je jednoduchá konštrukcia striekacieho zariadenia (Kolektív autorov, 2000).

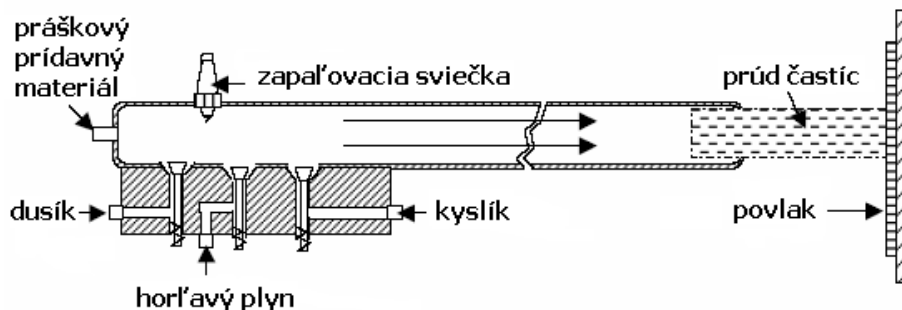
1.2.2 Detonačné žiarové striekanie

Pri tomto spôsobe práškového žiarového striekania sa využíva detonačná vlna, ktorá vzniká explóziou zmesi horľavého plynu (zväčša acetylénu) s kyslíkom. Zariadenie na detonačné striekanie sa nazýva detonačné delo a skladá sa z hlavne a spaľovacej komory (obr. 7). Do spaľovacej komory sú privádzané presne určené množstvá kyslíka, acetylénu a prášku (nosným médiom je dusík). Tým vzniká detonačná zmes, ktorá sa zapaluje zapalovacou sviečkou v určitých časových intervaloch (4 – 8 detonácií za sekundu). Detonačná vlna dosahuje teplotu až $4500 \text{ }^\circ\text{C}$.

Po každej explózii je spaľovacia komora vypláchnutá plynom, najčastejšie argónom alebo dusíkom (Knotek, 2001).

Pri detonácii sa vlna plameňa pohybuje rýchlosťou väčšou ako rýchlosť zvuku a sprevádza ju tlaková vlna s rýchlosťou okolo 3000 m.s^{-1} . V tomto vysokorýchlostnom prúde plynov sa častice prášku ohrievajú do plastického alebo roztaveného stavu. Natavené častice strhávané tlakovou vlnou dosahujú rýchlosť okolo 800 m.s^{-1} .

Vysoká kinetická energia častíc spôsobuje, že nanosené vrstvy vykazujú veľmi dobrú priľnavosť k základnému materiálu a pomerne nízku pórovitosť. Najčastejšie sa detonačným spôsobom nanášajú karbidy volfrámu, karbidy chrómu s niklom a oxidická keramika. Vrstvy dosahujú hrúbku $0,12 - 0,23 \text{ mm}$ (Kolektív autorov, 2000).



Obr. 7 Schéma detonačného striekacieho zariadenia (Stokes, 2008)

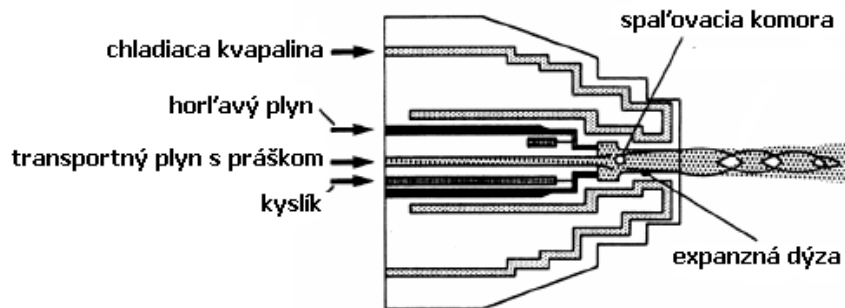
1.2.3 Vysokorýchlostné žiarové striekanie - HVOF

Vysokorýchlostné žiarové striekanie (High Velocity Oxy Fuel Spraying – HVOF Spraying) predstavuje špeciálny prípad plameňového žiarového striekania. Od klasického plameňového striekania sa odlišuje tým, že spaľovanie prebieha vo vnútri horáka a dosiahnuté tlaky a rýchlosti sú oveľa väčšie (Knotek, 2001).

Prudká expanzia horľavej zmesi plynov v striekacej pištoli udeľuje vysokú rýchlosť zmesi a súčasne práškovému prídavnému materiálu, ktorý je do spaľovacej komory privádzaný pomocou dusíka. Expandovaný plyn potom prechádza cez vodou chladenú dýzu, pričom prášok vo vyústení pištole dosahuje nadzvukovú rýchlosť (obr. 8). Rýchlosť dopadu nataveného prášku na povrch základného materiálu je približne 500 m.s^{-1} . Ako horľavé plyny sa najčastejšie používajú propylén, propán, vodík alebo acetylén. V poslednej dobe sa začali používať aj kvapalné palivá (napr. kerosín), ktoré dosahujú ešte vyššie rýchlosti nanášania. Teplota plameňa dosahuje hodnoty $2300 - 3000 \text{ }^\circ\text{C}$.

Výhodou tejto metódy je, že pracuje s minimálnym prebytkom kyslíka, čiže dochádza k minimálnej oxidácii častice počas letu. Preto povlaky vytvorené touto metódou majú veľmi dobrú kvalitu (Kolektív autorov, 2000).

Technológia HVOF sa úspešne aplikuje pri nanášaní kompozitných materiálov, napr. cermetov (WC-Co, Cr₂C₃-NiCr a pod), ktorých hustota a odolnosť proti opotrebeniu dosahujú vysoké hodnoty. HVOF striekanie sa však používa aj pri zliatinách na báze kobaltu (stellity) a niklu (Triballoy, zliatiny na báze NiCrBSi) (Knotek, 2001).



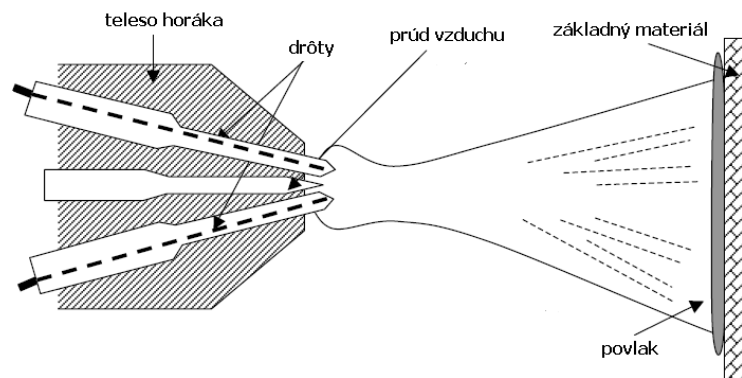
Obr. 8 Schéma vysokorychlostného striekacieho zariadenia HVOF (Knotek, 2001)

1.2.4 Žiarové striekanie elektrickým oblúkom

Princíp tejto metódy je založený na tavení vodivých materiálov teplom elektrického oblúka horiaceho medzi dvomi vodivými prídavnými materiálmi s rovnakým alebo rozdielnym zložením, z ktorých jeden je katódou a druhý anódou (obr. 9). Teplota oblúka dosahuje hodnoty nad 6000 °C. Stlačený vzduch, ktorý prúdi z dýzy vysokou rýchlosťou strháva roztavené častice kovu a vrhá ich na základný materiál (Ambrož, Kašpar, 1990).

Veľkosť striekaných častíc závisí od vzdialenosti medzi katódou a anódou, čiže od dĺžky oblúka, ktorý je priamoúmerný napätiu oblúka. Maximálna veľkosť častíc je 0,1 mm. Rýchlosť a teplota častíc je podstatne vyššia ako pri plameňovom striekaní. Preto častice striekané elektrickým oblúkom majú väčší termoúder na základný materiál, čo sa prejavuje vyššou príľnavosťou.

Obmedzením tejto metódy je, že pomocou nej je možné nanášať iba elektricky vodivé materiály – kovy a ich zliatiny. S tým je spojená nevýhoda, ktorou je pomerne silná oxidácia striekaných kovových častíc, najmä pri nedokonalnej optimalizácii posuvov drôtov (Kolektív autorov, 2000).



Obr. 9 Schéma princípu žiarového striekania elektrickým oblúkom (Stokes, 2008)

Vlastnosti vrstiev nanášaných elektrickým oblúkom možno ovplyvňovať nasledujúcimi technologickými parametrami (Ambrož, Kašpar, 1990):

- veľkosťou prúdu,
- veľkosťou napätia,
- tlakom rozstrekovacieho vzduchu,
- vzdialenosťou striekania,
- množstvom nanášaného prídavného materiálu.

1.2.5 Žiarové striekanie plazmou

Plazmové žiarové striekanie je najuniverzálnejším procesom žiarového striekania. Vysoké teploty vznikajúce pri plazmovom striekaní umožňujú nanášanie povlakov prakticky zo všetkých druhov materiálov.

Zdrojom energie pre plazmové striekanie je elektrický oblúk, ktorý sa zapaluje vysokofrekvenčnou iskrou. V praxi sa používajú dva princípy stabilizácie plazmového oblúka. Prvým z nich je plynová stabilizácia plazmového oblúka pomocou inertných plynov (argón, hélium, dusík alebo ich zmes). Druhým je kvapalinová stabilizácia plazmového oblúka, pri ktorej sa používa voda.

Oba princípy stabilizácie majú svoje opodstatnenie a využitie, ale v praxi je viac rozšírený systém plynovej stabilizácie. Tento systém je charakteristický vysokou koncentráciou energie a vysokými teplotami plazmového lúča (Ambrož, Kašpar, 1990).

Existujú dva spôsoby výroby plazmového prúdu, a to s preneseným a nepreneseným oblúkom. Na plazmové striekanie sa používa druhý spôsob, pri ktorom horí oblúk medzi volfrámovou katódou a stenou chladenej hubice, ktorá tvorí anódu. Do

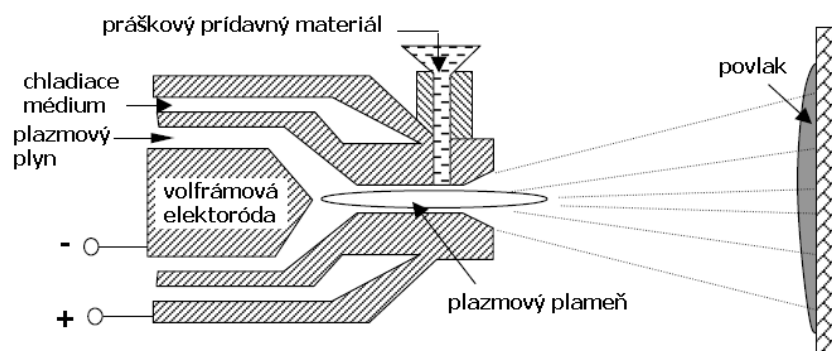
tejto hubice je vháňaný plazmový plyn. Keď plazmový plyn dosiahne oblasť oblúka, dochádza k jeho zohriatiu na vysokú teplotu (až 16000 °C) a nastáva jeho disociácia a ionizácia. Tak vzniká plazma, ktorá expanduje vysokou rýchlosťou z dýzy (2000 – 3000 m.s⁻¹).

Prídavný materiál, väčšinou vo forme prášku, je transportovaný plynom a vstrekaný do vysokoenergetického plazmového lúča. Miesto vstrekovania je závislé od konštrukcie horáka. Môže byť umiestnené buď do vnútra horáka, alebo mimo neho (obr. 10).

Rýchlosť častíc dosahuje hodnoty 300 – 700 m.s⁻¹ v závislosti od použitého plazmového plynu a prídavného materiálu. Hrúbka povlaku dosahuje hodnotu 50 – 250 μm (Knotek, 2001).

Pri žiarovom striekaní plazmou nie je potrebné používať stlačený vzduch ako prostriedok pre urýchlenie častíc nanášaného prídavného materiálu. Je to dané tým, že výstupné rýchlosti plazmového lúča a teda aj častíc prídavného materiálu dosahujú vysoké hodnoty (Kolektív autorov, 2000).

Uvedené skutočnosti o parametroch plazmového lúča svedčia o tom, že dosahované vlastnosti povlakov nanášaných plazmou sú na kvalitatívne vyššej úrovni oproti predchádzajúcim metódam. Vysoké teploty plazmového lúča umožňujú vytvárať povlaky v podstate zo všetkých dostupných materiálov, bez ohľadu na výšku ich teploty tavenia.



Obr. 10 Schéma princípu plazmového horáka (Stokes, 2008)

Za obmedzenie vo využívaní plazmy pri žiarových nástrekoch možno považovať oxidačný charakter stabilizačného prostredia u vodou stabilizovaných horákov, ktoré u kovov spôsobuje ich nadmernú oxidáciu a umožňuje nanášať iba materiály s vyššími oxidačnými stupňami (oxidy). Za nevýhodu tiež možno považovať technologicky

a ekonomicky náročné zariadenie na plazmové žiarové nástreky, ako aj niektoré škodlivé faktory vznikajúce pri prevádzke (Ambrož, Kašpar, 1990).

Vzhľadom na väčšiu zložitosť zariadenia a celého technologického procesu žiarového striekania plazmou existuje aj väčší počet technologických parametrov, ktoré ovplyvňujú vlastnosti nanášaných vrstiev (Ambrož, Kašpar, 1990):

- veľkosť plazmového prúdu,
- veľkosť napätia plazmového lúča,
- množstvo plazmového plynu,
- množstvo dopravného plynu,
- množstvo nanášaného prídavného materiálu,
- vzdialenosť striekania .

1.2.6 Indukčné žiarové striekanie

Prídavný materiál vo forme drôtu alebo tyčky sa nahrieva a taví vírivými prúdmi vznikajúcimi v dôsledku premenlivého magnetického poľa. Na rozstrekovanie častíc sa používa stlačený vzduch alebo inertné plyny. Veľkosť nanášaných častíc je 20 – 120 μm v závislosti od tlaku transportného plynu (Ambrož, Kašpar, 1990).

1.2.7 Žiarové striekanie laserom

Pri laserovom žiarovom striekaní je prášok s veľkosťou zrna 50 – 150 μm pomocou transportného plynu vháňaný pod laserový lúč smerujúci na povrch základného materiálu. Častice prášku absorbujú energiu laserového lúča, roztavia sa a uložia sa na povrchu základného materiálu (obr. 11). Časť energie absorbuje aj základný materiál, čo spôsobuje riadené natavenie tenkej vrstvy na jeho povrchu. To zabezpečí metalurgické spojenie povlaku so základným materiálom (Avunduk, 2006). Tento proces sa nazýva jednofázový proces (Schneider, 1998).

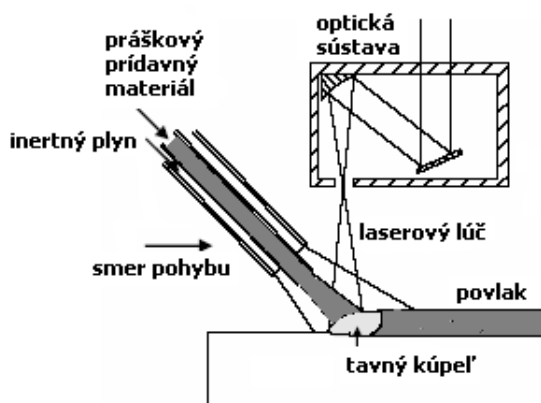
Najdôležitejšie technologické parametre, ktoré ovplyvňujú vlastnosti vrstiev nanášaných laserom sú:

- typ lasera,
- hustota energie,
- veľkosť, geometria a kvalita lúča,
- vzdialenosť nanášania,
- uhol nanášania,

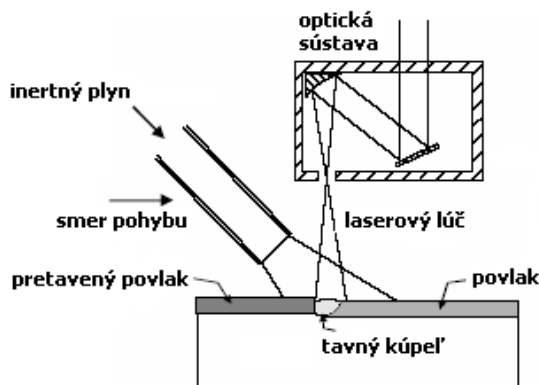
- vlastnosti prášku a pod.

Touto metódou je možné nanášať povlaky na báze kobaltu, niklu, samotroskotvorné prášky na báze NiCrBSi aj s prídavkom WC, ako aj ďalšie kompozitné materiály.

Laser je možné použiť aj pri tzv. dvojfázovom procese, na následné pretavenie povlaku naneseného jedným z predchádzajúcich spôsobov žiarového striekania (obr. 12). Pri tomto procese laserový lúč nespracováva priamo prídavný materiál, ale iba modifikuje vlastnosti vrstvy nanesej v prvej fáze (Schneider, 1998).



Obr. 11 Schéma laserového žiarového striekania (Schneider, 1998)



Obr. 12 Schéma pretavovania žiarového nástreku laserom (Schneider, 1998)

1.3 Technologický postup žiarového striekania

Aby povlaky zhotovené žiarovým striekaním dosiahli po nanesení požadované vlastnosti, je potrebné dodržať pri ich nanášaní určitý postup. Medzi najdôležitejšie časti technologického postupu žiarového striekania patria (Ambrož, Kašpar, 1990):

- príprava povrchu základného materiálu pred striekaním,

-
- voľba správnych technologických parametrov procesu striekania,
 - konečné úpravy vytvorených nástrekov.

1.3.1 Príprava povrchu základného materiálu pred žiarovým striekaním

Prípravou pred nástrekom sa zabezpečuje, aby mal povrch vhodnú geometrickú a energetickú vlastnosť pre vznik pevného spojenia medzi základným a prídavným materiálom. Optimálne podmienky pre vznik takehoto spojenia je možné dosiahnuť vytvorením vhodnej drsnosti povrchu a odstránením vlhkosti, mastnoty a oxidačnej vrstvy z povrchu súčiastky (Matejka, Benko, 1988).

1.3.1.1 Odmasťovanie povrchu

Aby sa dosiahla vynikajúca priľnavosť striekanej vrstvy so základným materiálom, je potrebné odstrániť mastnotu, ktorá zostáva na súčiastkach po obrábaní, konzervovaní alebo po bežnej prevádzke v mastnom prostredí. V zliatinách s pórovitou štruktúrou sa olej dostáva do vnútorných trhlín a pórov. Pri žiarovom striekaní sa potom olej vylučuje a odparuje, čo výrazne oslabuje pevnosť spojenia nástreku so základným materiálom. V takomto prípade je vhodné súčiastky vyžehať pri teplotách 250 – 500 °C.

Najčastejším spôsobom odmasťovania je odmasťovanie v chemických rozpúšťadlách. Rozpúšťadlo by nemalo zanechať na povrchu súčiastky žiadny film, ktorý by mohol znížiť priľnavosť nástreku (Matejka, Benko, 1988).

1.3.1.2 Abrazívne zdrsnenie povrchu

Zdrsnenie povrchu súčiastky pred nástrekom abrazívnym prostriedkom je jednou z najprogressívnejších metód, pri ktorej sa zrná abrazívneho prostriedku vrhajú na povrch základného materiálu prúdom stlačeného vzduchu alebo odstredivou silou. Časť kinetickej energie dopadajúceho zrna sa využije na plastickú deformáciu povrchových vrstiev, časť na štiepenie zŕn a vývin tepla. Zrná s ostrými hranami vytvárajú na povrchu záseky, ktoré vystupujú nad úroveň povrchu. Záseky sú rôzne orientované, navzájom sa pretínajú a značná časť výstupkov je ostrá (Kolektív autorov, 2000).

Tento spôsob úpravy povrchu spĺňa nielen požiadavku na zväčšenie plochy povrchu, ale aj požiadavku aktivácie povrchu prostredníctvom uvoľnenia medziatómových väzieb atómov povrchovej vrstvy základného materiálu. V dôsledku chemickej absorpcie plynov z atmosféry a oxidácie sa táto chemická aktivita povrchu pomerne rýchlo znižuje, čo má vplyv na zníženie priľnavosti nanoseného povlaku.

Časový interval medzi zdrsnením a nástrekom by nemal byť dlhší než 8 hodín (Ambrož, Kašpar, 1990).

Na mikrogeometriu abrazívne zdrsneného povrchu vplýva režim abrazie, najmä druh abraziva, uhol dopadu abraziva, rýchlosť dopadu abraziva, stupeň pokrytia povrchu.

Ako abrazívny prostriedok je možné použiť rôzne abrazívne častice na kovovej i nekovovej báze. Najčastejšie sa používa oceľová alebo liatinová drvina, umelý korund, karbid kremíka alebo kremičitý piesok (Ambrož, Kašpar, 1990). Optimálne hodnoty strednej aritmetickej odchýlky zdrsneného povrchu sú, podľa druhu základného materiálu, v rozsahu 7,3 – 20 μm (Kolektív autorov, 2000).

1.3.1.3 Mechanické obrobenie povrchu

V niektorých prípadoch je vhodné vykonať mechanickú úpravu povrchu súčiastky pred nástrekom vytvorením závitov, drážok a pod. Drážky zabezpečujú zväčšenie plochy kontaktu medzi základným materiálom a nástrekom. Zároveň vytvárajú záhyby v striekanej vrstve, čím zvyšujú jej pevnosť. Vytvorenie drážok je efektívne vtedy, keď je potrebné nanášať väčšie hrúbky vrstiev alebo bude vrstva pracovať v podmienkach veľkého zaťaženia. Tieto úpravy sa nepoužívajú na tvrdých a krehkých povrchoch, ako aj na veľkých plochách a povrchoch s komplexnou geometriou (Matejka, Benko, 1988).

Najčastejším spôsobom vytvárania drážok je sústruženie (pre rotačné súčiastky) a frézovanie (pre rovinné súčiastky). Pri mechanickom opracovaní sa nesmie použiť rezná kvapalina a znečistiť zdrsnený povrch (Kolektív autorov, 2000).

1.3.1.4 Nanášanie medzivrstiev

Ďalšou možnosťou úpravy povrchu základného materiálu je použitie tzv. kotviacich medzivrstiev. Pre tento účel sa používajú prídavné materiály, ktoré majú výbornú priľnavosť ako s podkladom, tak s nástrekom. Aby bola styčná plocha medzi kotviacou medzivrstvou a povlakom maximálna, používa sa prídavný materiál vo forme prášku s väčším zrnom (Ambrož, Kašpar, 1990).

Tieto medzivrstvy sa vytvárajú vtedy, keď nie je možné dostatočne zdrsniť základný materiál (materiály s vyššou tvrdosťou), pri veľmi dynamicky namáhaných súčiastkach alebo pri väčších hrúbkach povlakov.

Kotviace vrstvy sa vytvárajú buď z čistých kovov (Ni, Mo), alebo zo zliatin typu Ni-Cr, Ni-Al, Ni-Ti. Hrúbka medzivrstvy býva v rozsahu 0,1 – 0,2 mm (Kolektív autorov, 2000).

1.3.2 Konečné úpravy nástrekov

Vrstvy vytvorené žiarovým striekaním sú charakteristické svojou štruktúrou a pórovitosťou. Pórovitosť je možné v niektorých prípadoch účelne využiť, avšak vo väčšine prípadov sa vyžadujú hladké povrchy s určitou úpravou. Konečná úprava povrchu môže byť uskutočnená rôznymi spôsobmi (Ambrož, Kašpar, 1990).

Jedným zo spôsobov je natieranie farbami, ktoré utesňujú póry a tým zlepšujú antikoročné vlastnosti vytvorených vrstiev.

Niektoré typy nástrekov, napr. keramické, sa impregnujú voskami, ktoré tiež utesňujú póry a zlepšujú ich následnú obrobitelnosť.

Veľmi častým spôsobom je tepelné spracovanie nástreku natavením (dvojfázový nástrek), pri ktorom dochádza ku zmene štruktúry nástreku. Ohrevom nástreku do blízkosti teploty solidu vzniká súvislá difúzna vrstva medzi povlakom a základným materiálom, odstráni sa pórovitosť a lamelárna štruktúra prvotného nástreku. Ohrev môže byť uskutočnený plameňom, v peci, indukčne alebo laserom (Kolektív autorov, 2000).

Tepelné spracovanie nástreku plameňom sa často používa pri samotroskotvorných zliatinách typu NiCrBSi. Pri ohreve povrchu týchto zliatin na teplotu 1000 – 1100 °C sa bór a kremík menia na B₂O₃ a SiO₂. V povlaku sa tvoria oxidy kovov rozpúšťajú a vzniká sklovitá troska, ktorá vypláva na povrch pretavovaného nástreku. Tým sa vytvorí tvrdá a húževnatá štruktúra s minimálnym množstvom pórov. Pretavením nástreku až na hranicu so základným materiálom sa vytvára tavné spojenie s vyššou pevnosťou. Výslednou štruktúrou je tuhý roztok niklu a chrómu s obsahom karbidických častíc s vysokou tvrdosťou (Matejka, Benko, 1988).

Jedným z možných spôsobov konečnej úpravy nástrekov je aj trieskové obrábanie. Pri tomto spôsobe je potrebné brať do úvahy, že ide o vrstvy s malou tlakovou pevnosťou. Tomu je potrebné prispôsobiť parametre obrábania. Pre veľmi tvrdé vrstvy je vhodné iba brúsenie.

1.4 Materiály na tvorbu povlakov žiarovým striekaním

Ako už bolo uvedené v predchádzajúcom texte, pomocou žiarového striekania je možné nanášať prakticky všetky druhy materiálov. Je to dané rôznorodosťou princípov, na ktorých sú založené jednotlivé technológie žiarového striekania.

Podľa Knoteka (2001) nanesený ako povlak pomocou žiarového striekania môže byť každý materiál, ktorý je možné roztaviť bez toho, aby sa rozložil na zložky alebo vyparil.

V nasledujúcom texte budú uvádzané iba materiály, ktoré je možné použiť pre žiarové striekanie povlakov odolných proti opotrebeniu, najmä abrazívnemu.

1.4.1 Rozdelenie prídavných materiálov podľa chemického zloženia

1.4.1.1 Kovové prídavné materiály

Podľa Knoteka (2001) sa na tvorbu vrstiev s vysokou odolnosťou proti opotrebeniu používajú tri skupiny kovových materiálov. Sú to materiály na báze železa, niklu a kobaltu. Tieto tri kovy tvoria základnú maticu a viažu sa z ďalšími kovovými, príp. nekovovými prvkami, ktorých prítomnosť v štruktúre zabezpečuje požadované vlastnosti výsledného materiálu (tab. 1).

Tab. 1 Chemické prvky tvoriace zliatiny s vysokou odolnosťou proti opotrebeniu (Knotek, 2001)

Matrica (základný kov)	Kovy tvoriace tvrdé fázy	Nekovy	Ostatné zliatinové prvky
Fe	Cr	C	Mn
	W	Si	Ni
	Mo	(B)	V
Co	Cr	C	Ni
	W	Si	Cu
	Mo	(B)	
Ni	Cr	B	Fe
	(Mo)	Si	Cu
		(C)	(Co)

Pridaním uhlíka, kremíka alebo bóru do zliatin na báze Fe, Co alebo Ni, vznikajú veľmi tvrdé zliatiny, ktoré majú veľký význam pri aplikáciách vyžadujúcich odolnosť proti opotrebeniu. Táto vysoká odolnosť proti opotrebeniu, často spojená aj

s odolnosťou proti korózii, je spôsobená vznikom tvrdých fáz (karbidov, boridov), ktoré precipitujú ako primárne, príp. sekundárne karbidy alebo ako binárne, príp. ternárne eutektiká.

Vznik uvedených tvrdých štruktúr umožňuje prítomnosť karbidotvorných prvkov v zložení daných zliatin, ako napr. chrómu, wolfrámu, molybdénu a vanádu. Chróm okrem toho zabezpečuje aj odolnosť materiálu proti korózii. Uhlík, bór a kremík potom spolu s karbidotvornými prvkami vytvárajú homogénne dispergované tvrdé častice v húževnatej eutektickej matrici, ktorá slúži ako spojivo (Knotek, 2001).

Materiály pre tvorbu povlakov na báze Fe

Medzi materiály na tvorbu tvrdých vrstiev na báze Fe patria materiály typu martenzitickej, príp. austenitickej ocele. Za materiály typu martenzitickej ocele možno považovať všetky, ktoré môžu kalením získať martenzitickú štruktúru. Dosiaditeľná maximálna tvrdosť martenzitického návaru je závislá najmä od obsahu uhlíka a môže dosiahnuť až hodnoty 700 HV (pri obsahu 0,6 % C). Pre klasifikáciu martenzitických materiálov je smerodajná tzv. prirodzená tvrdosť, ktorá je dosiahnutá ochladzovaním na vzduchu (Marko, Balla, 1982).

Materiály pre tvorbu povlakov na báze Co

Neželezné materiály na tvorbu tvrdých povlakov, ktorých základ je tvorený kobaltom, sa nazývajú stellity. Ich štruktúra je tvorená základnou húževnatou hmotou, v ktorej sú rozmiestnené tvrdé štruktúrne zložky karbidov chrómu, wolfrámu a železa buď voľné, alebo viazané v eutektiku.

Sú charakteristické vysokou tvrdosťou (350 – 500 HV), ktorú si zachovávajú až do teploty 700 °C (zásluhou kobaltu) a túto vysokú tvrdosť dosahujú aj bez tepelného spracovania. Okrem toho majú vysokú odolnosť proti opotrebeniu a chemikáliám. Tieto vlastnosti predurčujú stellity na široké možnosti použitia v rôznych odvetviach.

Pretože kobalt patrí medzi drahé kovy, je cena stelitov pomerne vysoká, najmä pri vyšších obsahoch kobaltu (Marko, Balla, 1982).

Materiály na tvorbu povlakov na báze Ni

Kvôli vysokej cene sú stellity pri mnohých aplikáciách nahradzované materiálmi na báze niklu, ktoré sa nazývajú nepravé stellity.

K najčastejšie používaným materiálom na tvorbu tvrdých povlakov na báze niklu patria samotroskotvorné práškové prídavné materiály typu NiCrBSi. Uvedené práškové prídavné materiály vytvárajú podeutektické zliatiny, ktoré sú tvorené tuhým roztokom Ni a eutekticky vylúčenými karbidmi a boridmi. Po stuhnutí dosahujú tvrdosť 300 – 800 HV v závislosti od chemického zloženia, najmä obsahu C a Cr (Bajda, 2006).

1.4.1.2 Nekovové prídavné materiály

Najdôležitejším nekovovým materiálom, ktorý je možné použiť na tvorbu veľmi tvrdých vrstiev, je keramika. Okrem vysokej tvrdosti má vysokú odolnosť proti korózii a veľmi dobrú tepelnú stabilitu. Tieto vlastnosti sú dané typom atómovej väzby medzi zložkami tvoriacimi keramický materiál. Vo väčšine prípadov ide o iónovú alebo kovalentnú väzbu (Wachtman, Haber, 1993).

Najrozšírenejšie sú keramické povlaky na báze oxidov. Najrozšírenejším keramickým materiálom používaným na tvorbu vrstiev je oxid hlinitý Al_2O_3 , ktorý sa vyznačuje vysokou tvrdosťou, nízkou tepelnou vodivosťou, odolnosťou proti korózii a odolnosťou proti opotrebeniu aj za vysokých teplôt. Často sa používa v kombinácii oxidom titaničitým TiO_2 (3 – 12 %), ktorý zvyšuje hutnosť povlaku, ako aj jeho oteruvzdornosť a odolnosť proti korózii. Povlaky s veľmi vysokou tvrdosťou a odolnosťou proti abrazívnemu a erozívnemu opotrebeniu vytvárajú aj stabilizovaný oxid zirkoničitý ZrO_2 a oxid chromitý Cr_2O_3 .

Keramické povlaky sú vo všeobecnosti veľmi porézne. Zníženie pórovitosti sa dosahuje primiešavaním rôznych oxidov. Na zlepšenie spojenia keramickej vrstvy so základom je potrebné základ zdrsniť a naniesť na jeho povrch kontaktnú vrstvu Co, NiCr (Knotek, 2001).

Okrem keramických povlakov na báze oxidov existujú aj neoxidické keramické povlaky, buď na báze uhlíka (WC, SiC, B_4C , TiC, Mo_2C) alebo na báze dusíka (Si_3N_4 , BN, TiN).

1.4.1.3 Kompozitné prídavné materiály

Často sa štruktúra materiálov na báze Fe, Co alebo Ni obohacuje o pevné častice s veľmi vysokou tvrdosťou, čím vznikajú veľmi tvrdé zmesi. Pretože ide o zmes materiálov s rôznou štruktúrou a rôznymi vlastnosťami, označujú sa tieto materiály ako kompozity.

Ako tvrdé fázy vystupujú karbidy (WC , W_2C , TiC , Cr_3C_2), nitridy (TiN , ZrN , TaN , AlN) alebo boridy (TiB_2 , CrB). Táto kombinácia prináša výrazné zvýšenie oteruvzdornosti nanesej vrstvy (Knotek, 2001).

Najčastejšie sa ako tvrdá fáza používa karbid volfrámu. Ten vytvára dva typy väzieb – WC (s tvrdosťou 2400 HV) a W_2C (s tvrdosťou až 3000 HV). Tvar zrna karbidu volfrámu môže byť ihlicovitý, alebo guľovitý (Herman, 2006).

Štruktúra materiálov na tvorbu povlakov na báze Co a Ni sa často obohacuje o pevné častice veľmi tvrdých materiálov, ako napr. WC , ktoré majú oveľa vyššiu tvrdosť a odolnosť proti opotrebeniu. Typickým predstaviteľom tejto kategórie povlakov je kombinácia zliatiny $WC-NiCrBSi$, kde tvrdú fázu tvorí karbid volfrámu a maticiu tvorí zliatina na báze Ni . Podiel WC v štruktúre stuhnutého povlaku sa pohybuje v rozsahu 10 – 65 %. Tvrdosť tejto zmesi dosahuje hodnotu 800 – 1100 HV (Bajda, 2006).

Ďalším predstaviteľom tohto typu prídavných materiálov je zmes $WC-Co$. Tvrdá fáza WC je umiestnená v základnej kobaltovej matici. Obsah Co býva v rozsahu 8 – 20 %. Tento materiál veľmi dobrú odolnosť proti opotrebeniu a vynikajúce trecie vlastnosti (Knotek, 2001).

V prostrediach s abrazívnym opotrebením sa často používa aj zmes Cr_3C_2-NiCr . Karbid chrómu Cr_3C_2 je umiestnený v základnej húževnatej hmote $NiCr$. Podiel karbidickej zložky sa pohybuje v intervale 65 – 80 %. Táto zmes si udržiava oteruvzdornosť a vysokú odolnosť proti korózii až do teploty 900 °C (Knotek, 2001).

1.4.2 Rozdelenie prídavných materiálov podľa tvaru

Z hľadiska tvaru sa prídavné materiály na tvorbu povlakov žiarovým striekaním rozdeľujú do troch skupín.

1.4.2.1 Prídavné materiály v tvare drôtu

V tvare drôtu sa ako prídavné materiály vyrábajú čisté kovy a zliatiny, pretože sú dostatočne štruktúrne rovnomeré a majú dobrú plasticitu, t. j. je možné z nich drôty vyrobiť. Z opotrebeniu odolných materiálov sa v tvare drôtov vyrábajú najmä zliatiny na báze Fe (austenitické a martenzitické ocele).

Prídavné materiály v tvare drôtu sa používajú pri plameňovom drôtovom striekaní, striekaní elektrickým oblúkom a niekedy aj pri striekaní plazmou (Kolektív autorov, 2000).

1.4.2.2 Prídavné materiály v tvare tyčky

V tvare tyčky sa na žiarové striekanie používa jedine oxidická keramika na báze Al_2O_3 . Tyčky sa zhotovujú práškovou metalurgiou z oxidu hliníka Al_2O_3 , zirkónsilikátu ZrSiO_4 a oxidu chrómu CrO_3 . Na nástrek sa používa plazmový horák z vodnou stabilizáciou (Kolektív autorov, 2000).

1.4.2.3 Prídavné materiály v tvare prášku

Práškové prídavné materiály sú najčastejšie používanými materiálmi pri žiarovom striekaní. Prakticky všetky uvedené druhy materiálov sú k dispozícii vo forme práškov. Možno teda pomocou nich získať povlaky aj z takých materiálov, z ktorých nie je možné vyrobiť drôt alebo tyčku.

Kovové prášky sa vyrábajú buď striekaním z taveniny v ochrannej atmosfére argónu do vody (kovy a zliatiny), elektrochemicky (kompozity) alebo spekaním (keramika) (Kolektív autorov, 2000).

1.5 Vlastnosti povlakov vytvorených žiarovým striekaním

Medzi základné vlastnosti povlakov možno zaradiť nasledovné vlastnosti (Filipenský, 2005):

- priľnavosť povlaku k základnému materiálu (adhézia),
- súdržnosť povlaku (kohézia),
- pórovitosť povlaku,
- tvrdosť povlaku, príp. odolnosť proti opotrebeniu,
- lomová húževnatosť a pod.

1.5.1 Priľnavosť povlaku k podkladu (adhézia)

Pod priľnavosťou sa rozumie súhrn povrchových síl, ktorými sa priťahujú navzájom častice rôznych materiálov. Priľnavosť povlaku k základnému materiálu je najdôležitejšou vlastnosťou, pretože bez dostatočnej priľnavosti by povlak nemohol byť využívaný v prevádzke za účelom, pre ktorý bol vytvorený. Primárnym faktorom ovplyvňujúcim adhéziu, ale aj kohéziu, povlaku sú zvyškové napätia spôsobené veľmi rýchlym ochladzovaním častíc.

Prilnavosť je ovplyvňovaná najmä teplotou častíc a základného materiálu a časom ich vzájomného pôsobenia, rýchlosťou častíc, ako aj stavom povrchu základného materiálu a vzájomnou rozpustnosťou častíc a základného materiálu (Kolektív autorov, 2000).

Čím väčšiu rýchlosť častica dosiahne, tým má väčšiu kinetickú energiu a tým väčšia bude deformácia roztavenej častice pri náraze na povrch základného materiálu. To spôsobí homogénnejšiu štruktúru povlaku s menším obsahom pórov, ako aj lepšiu prilnavosť a súdržnosť povlaku (Knotek, 2001).

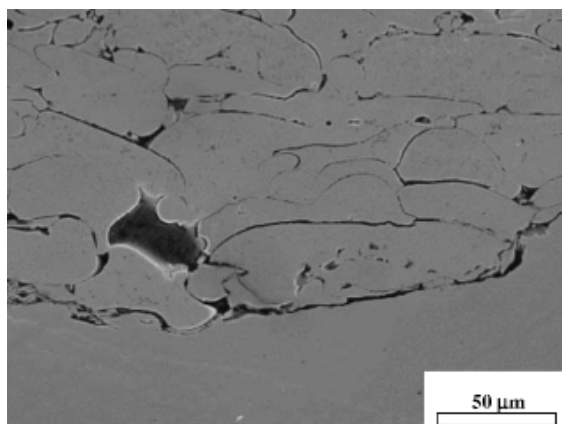
To súvisí so samotným princípom tvorby vrstvy žiarovým striekaním, ako aj s hladinou vnútorných napätí, ktoré vznikajú pri ochladzovaní v povlaku. Vzniknuté vnútorné napätia môžu byť ťahové aj tlakové. Veľkosť a druh týchto napätí je závislý od rozdielu teplôt nástreku a základného materiálu, ako aj od rozdielu tepelných rozťažností oboch materiálov (Wegner, 2004).

1.5.2 Súdržnosť povlaku (kohézia)

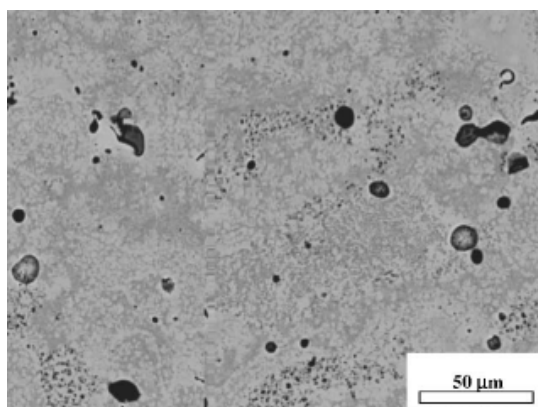
Súdržnosť je súhrn síl, ktorými sa priťahujú častice rovnakého materiálu. Podľa Knoteka (2001) súdržnosť povlaku, podobne ako prilnavosť, závisí od rýchlosti a teploty častíc. Čím väčšiu rýchlosť častica dosiahne, tým má väčšiu kinetickú energiu a tým väčšia bude deformácia roztavenej častice pri náraze na poklad. To spôsobí homogénnejšiu štruktúru povlaku s menším obsahom pórov, oxidov, príp. nedeformovaných častíc, ktoré narušujú štruktúrnú homogenitu povlaku.

Aby bolo možné vytvoriť vrstvu, mali by byť všetky častice pri dopade na povrch základného materiálu roztavené. To znamená, že ak sa všetky častice pri prechode plameňom roztavia a vo fáze preletu sa zmenší tepelná strata, častice pri dopade na povrch základného materiálu budú roztavené. Preto je veľmi dôležitá voľba vhodnej veľkosti častíc u práškových prídavných materiálov a správneho posuvu u drôtov a tyčiek.

Dôležitým faktorom ovplyvňujúcim súdržnosť povlaku je aj oxidácia častíc počas fázy preletu. Vrstva oxidov, ktorá sa na povrchu častíc vytvorí pri dopade zabraňuje vytvoreniu homogénnej vrstvy a častice zostávajú navzájom oddelené. Na obr. 13 a 14 sú zobrazené povlaky NiCrBSi vytvorené plazmou a plameňom. Pri striekaní plazmou došlo k oxidácii čiastočiek, preto tvoria nehomogénnu vrstvu. Pri nanášaní plameňom došlo k pretaveniu povlaku, čím sa vytvorila liata štruktúra (Rodríguez et al., 2003).



Obr. 13 Štruktúra plazmou nanášaného povlaku NiCrBSi (Rodríguez et al., 2003)



**Obr. 14 Štruktúra plameňom nanášaného povlaku NiCrBSi
(Rodríguez et al., 2003)**

So zväčšovaním veľkosti častíc narastá pórovitosť vrstvy, čo spôsobuje zníženie jej adhézie a kohézie, ale na druhej strane zvýšenie pevnosti v ohybe. Pretože sú častice zohriate na veľmi vysokú teplotu, musia mať dostatočnú veľkosť, aby sa pri tavení neodparili. Okrem toho ochladzovanie veľmi malých častíc počas fázy preletu by bolo veľmi rýchle, takže na povrch základného materiálu by dopadla stuhnutá častica. Prilnavosť nástreku tiež závisí od stupňa deformácie pri náraze častice, na čo má veľký vplyv jej kinetická energia (rýchlosť častíc) a teplota (Wegner, 2004).

1.5.3 Pórovitosť povlaku

Pórovitosť možno charakterizovať ako súčet všetkých prázdnych miest v povlaku. Póry vznikajú pri striekaní uväznením plynov v priestore medzi dopadnutými a stuhnutými časticami. Pórovitosť klesá s narastajúcou teplotou a rýchlosťou častíc (Wegner, 2004).

Pórovitosť taktiež závisí od veľkosti a húževnatosti častíc. S nárastom veľkosti častíc narastá aj veľkosť a podiel pórov v štruktúre povlaku. Čím je materiál častíc húževnatejší a plastickejší, tým lepšie vyplňa priestor a klesá pórovitosť. Pórovitosť nástrekov tiež závisí od technológie striekania (tab. 2).

Pórovitosť vo všeobecnosti nie je žiadaná u žiarových nástrekov, pretože predstavujú nehomogenitu v štruktúre povlakov a tým znižujú ich mechanické vlastnosti. Prítomnosť pórov v štruktúre povlakov taktiež znižuje ich ochrannú funkciu, najmä proti oxidácii a korózii (Kolektív autorov, 2000).

V niektorých prípadoch sú póry v štruktúre povlaku vítané, pretože môžu slúžiť ako zásobárne maziva a zlepšiť tak klzné vlastnosti funkčného povrchu (Kniewald, Bačová, 1997).

Tab. 2 Závislosť niektorých vlastností vrstiev od technológie nanášania (Bhushan, Gupta, 1991; Davis, 2001)

Technológia	Zdroj energie	Tvar prídavného materiálu	Druh prídavného materiálu	Teplota plameňa (°C)	Rýchlosť častíc (m.s ⁻¹)	Adhézia (MPa)	Pórovitosť (%)	Obsah oxidov (%)
Plameň	kyslík + acetylén	prášok, drôt, tyčka	kovy, zliatiny, kompozity	3300	240	20 - 28	10 - 20	10 - 15
Plameň s pretavením	kyslík + acetylén	-	-	-	-	> 70	< 0,5	-
Detonácia	kyslík + acetylén + dusík	prášok	kovy, zliatiny, keramika, kompozity	4500	800	> 70	0,1 - 1	1 - 5
HVOF	kyslík + plropylén, vodík, propán, kerosín	prášok	kovy, zliatiny, keramika, kompozity	2800	1350	40 - 96	0,5 - 2	1 - 5
Elektrický oblúk	elektrický oblúk medzi elektródami	drôt	húževnaté a vodivé materiály	6000	240	40 - 60	8 - 15	10 - 20
Plazma	plazmový oblúk	prášok, drôt	kovy, zliatiny, keramika, kompozity	16000	120 - 600	30 - 70	2 - 5	1 - 3

1.5.4 Tvrdosť povlaku

Tvrdosť je základnou mechanickou vlastnosťou, na základe ktorej sa často určuje vhodnosť povlaku pre konkrétne použitie. Tvrdosť povlaku je závislá predovšetkým od chemického zloženia a mikroštruktúry povlaku (kap. 3.4). Tvrdosť však ovplyvňujú aj niektoré technologické faktory.

V prvom rade je to technológia nanášania. Technológie s vyššími rýchlosťami a teplotami nanášania dosahujú lepšiu kohéziu a nižšiu pórovitosť, čo sa prejavuje zvýšenou tvrdosťou povlaku. Miguel et al. (2003) porovnávali rôzne technológie nástreku povlakov na báze NiCrBSi. Najlepšie výsledky dosiahol HVOF nástrek. Zistili aj to, že plazmový nástrek toho istého materiálu dosiahol nižšiu tvrdosť ako nástrek plameňom s následným pretavením.

Rodríguez et al. (2003) zistili podobne, že tvrdosť a odolnosť proti opotrebeniu plazmového nástreku materiálu na báze NiCrBSi dosiahli nižšie hodnoty oproti plameňovému nástreku s následným pretavením. Je to spôsobené pravdepodobne tým, ako je uvedené v kap. 3. 3. 2, že pri následnom pretavení dochádza k zníženiu obsahu pórov a k zvýšeniu pevnosti spoja so základným materiálom.

1.5.5 Lomová húževnatosť povlaku

Pri niektorých aplikáciách je dôležitou vlastnosťou povlakov ich lomová húževnatosť (abrazívne opotrebenie s rázmi, erozívne opotrebenie). Houdková, Bláhová, Svitáková (2007) skúmali pomocou skúšky intendačnej lomovej húževnatosti rôzne typy povlakov (kompozity typu WC-Co, Cr₃C₂-NiCr, zliatinu na báze NiCrBSi, keramiku Cr₂O₃). Najlepšie hodnoty dosiahli kompozitné materiály, pričom odolnosť proti šíreniu trhlín je daná najmä typom matrice, jej podielom, ako aj homogenitou štruktúry a pórovitosťou. Najnižšiu húževnatosť dosiahol keramický nástrek, ktorý je prirodzené veľmi krehký.

1.5.6 Odolnosť proti opotrebeniu

Technológie žiarového striekania sa najčastejšie používajú na vytváranie povlakov z materiálov s vysokou odolnosťou proti opotrebeniu pri renováciách opotrebených funkčných častí strojov, príp. pri ochrane funkčných častí strojov proti intenzívnemu opotrebeniu. Najbežnejším druhom opotrebenia, ktorému sú takého povlaky v prevádzke vystavené, je abrazívne opotrebenie.

Hodnotením odolnosti práškových návarových materiálov proti abrazívnemu opotrebeniu sa zaoberali Marko, Balla, Sečkář (1975). Experimenty vykonali podľa normy STN 015084. Ako porovnávací materiál použili oceľ 12 014.2. Návarové prášky boli aplikované kyslíkovo-acetylenovým plameňom pomocou horáka NPK-1. Boli skúmané tvrdonávarové materiály na báze NiCrBSi. Materiál K-50 (0,35 % C, 2,5 % B, 4,5 % Si, 10 % Cr, 3 % Fe, zvyšok Ni; tvrdosť 515 HV) dosiahol odolnosť proti opotrebeniu $\psi_{abr} = 1,84$. Materiál K-55, ktorý mal oproti predchádzajúcemu materiálu vyšší obsah C, Cr, B a navyše obsahoval W a Mo, dosiahol hodnotu odolnosti proti opotrebeniu $\psi_{abr} = 2,6$. Tvrdosť materiálu K-55 bola 647 HV.

Bajda (2005) uvádza výsledky skúmania odolnosti proti abrazívnemu opotrebeniu práškových zliatin na báze NiCrBSi od rôznych svetových výrobcov. Zistené hodnoty pomernej odolnosti proti opotrebeniu sú doplnené údajmi o tvrdosti daných materiálov po nanosení.

Zo skúmaných návarových zliatin dosiahla najvyššiu pomernú odolnosť proti abrazívnemu opotrebeniu zliatina HMSP 1060 (0,75 % C, 3,1 % B, 4,3 % Si, 14,8 % Cr, 3,7 % Fe, zvyšok Ni; tvrdosť 772 HV 10). Jej hodnota je $\psi_{abr} = 4,2$. O niečo nižšiu hodnotu, $\psi_{abr} = 3,98$, dosiahla zliatina Colmonoy 6 (0,7 % C, 3 % B, 4,2 % Si, 14,3 % Cr, 4 % Fe, zvyšok Ni; tvrdosť 784 HV 10). Tieto dve zliatiny majú aj veľmi podobné podobné chemické zloženie. Z toho vyplýva, že aj štruktúrne zloženie oboch zliatin bude veľmi podobné.

2 Cieľ práce

Existuje mnoho technológií, ktoré je možné využiť na nanášanie tvrdých vrstiev z práškových prídavných materiálov. Mnohé z nich boli skúmané výskumníkmi z celého sveta. Z hľadiska technologického pokroku je potrebné postupne nahrádzať doteraz používané technológie a technologické postupy novými, ktoré môžu priniesť zvýšenie životnosti, výkonnosti, príp. usporu energií a materiálov.

Aplikácia technológie žiarového striekania, ktorá v poslednom období zaznamenala pomerne rýchly rozvoj a prenikla do mnohých odvetví hospodárstva, je jednou z technológií, pomocou ktorých by tieto ciele bolo možné dosiahnuť.

Aby bolo možné navrhnúť optimálne technologické riešenie nanášania tvrdých vrstiev s cieľom dosiahnuť ich optimálne výsledné vlastnosti, je potrebné, okrem iného, poznať možnosti aplikácie dostupných technológií a ich vhodnosť pre dané použitie.

Preto cieľom diplomovej práce je analyzovať a posúdiť možnosti ovplyvňovania výsledných vlastností vrstiev vytvorených žiarovým striekaním ich následným pretavením. Výsledkom pretavenia by mala byť homogénnejšia štruktúra nanesej vrstvy, ktorá prinesie jej lepšie výsledné vlastnosti. Pretože vo väčšine aplikácií tvrdých vrstiev je požiadavka odolnosti týchto vrstiev proti abrazívnemu opotrebeniu, budú v práci skúmané ich tribologické vlastnosti, konkrétne opolnosť proti abrazívnemu opotrebeniu na brúsnom plátne.

3 Metodika práce

3.1 Výber a charakteristika skúmaných materiálov

Vzhľadom na technologické možnosti realizácie žiarového striekania na Katedre kvality a strojárskych technológií boli pre experimenty vybrané práškové tvrdonávarové materiály na báze NiCrBSi – NP 52, NP 58 a NP 62. Ich výrobcom je Výskumný ústav zvaračský – Priemyselný inštitút SR v Bratislave. Ide o samotroskotvorné práškové prídavné materiály na báze NiCrBSi vhodné na nanášanie plameňom a plazmou.

Všetky uvedené prídavné materiály sa používajú na tvorbu vrstiev odolných proti opotrebeniu, korózii a oxidácii. Prášky sú vhodné na nanášanie zakrivených plôch a hrubých stien a používajú sa na nanášanie funkčných plôch hriadeľov, puzdier a pri stavbe strojov a zariadení, kde sa vyžaduje extrémna odolnosť proti opotrebeniu, korózii a teplote.

Chemické zloženie a tvrdosť po nanosení skúšaných materiálov sú uvedené v tabuľke 3.

Tab. 3 Parametre naváracích práškov typu NiCrBSi od VÚZ-PI, a. s. Bratislava
(http://www.vuz.sk/vyroba_pm_3_7_3.html)

Materiál	Smerné chemické zloženie (hmot. %)									Tvrdosť HRC
	C	Si	B	Fe	Cu	Cr	W	Mo	Ni	
NP 52	max. 0,5	max. 5,0	max. 3,5	max. 5,0	-	8,0 14,0	-	-	zv.	48 - 54
NP 58	max. 0,6	max. 4,5	max. 4,0	max. 10,0	max. 2,5	max. 15,0	max. 2,5	max. 2,5	zv.	54 - 59
NP 62	max. 0,9	max. 5,5	max. 4,0	max. 5,0	-	max. 20,0	-	-	zv.	58 - 65

Materiály vybrané pre experiment sa od seba líšia chemickým zložením. Materiály NP 52 a NP 62 majú vo väčšine prvkov podobné chemické zloženie, rozdiel je iba v obsahu uhlíka a chrómu, ktorý je väčší u materiálu NP 62. Materiál NP 58 obsahuje navyše aj Cu, W a Mo. Z hľadiska tvrdosti sú skúmané materiály odstupňované po približne 5 HRC, pričom najmäkší je materiál NP 52 a najtvrdší je materiál NP 62.

3.2 Postup prípravy vzoriek

Z každého skúmaného materiálu bude vyrobených 5 vzoriek podľa špecifikácií uvedených v norme STN 015084. Vzorky budú mať priemer \varnothing 10 mm a dĺžku 55 mm s drsnosťou pracovnej plochy $0,4 \mu\text{m}$ a ostatných plôch $1,6 \mu\text{m}$.

Pretože v daných podmienkach nie je možné z práškových materiálov vytvoriť celé vzorky, budú tieto prášky nanosené na podkladový materiál (z ocele 11 373) v tvare valca s uvedenými rozmermi. Hrúbka povlaku musí byť minimálne 2 mm.

Na výrobu vzoriek bude použitý prípravok na naváranie vzoriek pre skúšku odolnosti proti opotrebeniu na brúsnom plátne, ktorý je na Katedre kvality a strojárskych technológií TF SPU v Nitre k dispozícii (obr. 15). Tým, že budú všetky vzorky navárané naraz, je možné dosiahnuť rovnomernosť vlastností povlaku na všetkých vzorkách.



Obr. 15 Prípravok na naváranie vzoriek pre skúšku na brúsnom plátne

Vzorky budú pri naváraní umiestnené v šablóne z oceľového pásu, v ktorom sú vyvítané otvory podľa priemeru vzoriek. Umiestnenie vzoriek v šablóne zabezpečí ich stabilnú polohu. Návar bude mať šírku minimálne 20 mm. Po navarení bude šablóna rozrezaná a vzorky s povlakmi budú na brúske vybrúsené do valcovitého tvaru s priemerom 10 mm. Navarené konce skúšobných vzoriek sa zároveň obrúsia do roviny a na drsnosť $0,4 \mu\text{m}$.

Na výrobu porovnávacích skúšobných telies bude použitá, v súlade s normou STN 015084, oceľ 12 014.20 s tvrdosťou 95 – 105 HV a s rozmermi rovnakými ako skúšobné vzorky skúmaných tvrdonávarových materiálov.

Skúmané materiály budú nanášané pomocou kyslíkovo-acetylénového plameňa prostredníctvom horáka NPK 1A (obr. 16). Pre nanášanie všetkých použitých práškov je výrobcom predpísaný neutrálny plameň.

Pri nanášaní vzoriek budú použité dva režimy. V prvom režime budú jednotlivé tvrdonávarové materiály nanášané v jednej vrstve bez následného pretavenia. V druhom režime budú jednotlivé tvrdonávarové materiály nanášané v jednej vrstve a následne bude celá nanesená vrstva pretavená kyslíkovo-acetylénovým plameňom.



Obr. 16 Horák pre plameňopráškové naváranie NPK 1A

3.3 Postup merania a vyhodnocovania

3.3.1 Meranie tvrdosti

Vzhľadom na to, že vzorky pre skúšku na brúsnom plátne budú pripravované v šablóne a šírka návaru bude minimálne 20 mm, je možné využiť zvyšky po rozbrúsení šablóny na zisťovanie tvrdosti jednotlivých povlakov. Je potrebné zabezpečiť, aby vzorka na skúšanie tvrdosti mala rozmery minimálne 10 x 10 mm. Bude vhodné povrch povlaku pred skúškou tvrdosti zabrúsiť do roviny.

Na skúšanie tvrdosti povlakov bude, vzhľadom na ich vysokú tvrdosť, použitá metóda HRC podľa normy STN ISO 6508-1. Skúška bude vykonaná na prístroji Lucznik (obr. 17). Tvrdosť etalónového materiálu bude meraná metódou Vickersa podľa normy STN ISO 6507-1.



Obr. 17 Tvrdomer Lucznik pre Rockwellovu metódu

3.3.2 Meranie a vyhodnocovanie odolnosti proti abrazívnemu opotrebeniu

Najčastejšie sa na skúmanie správania sa materiálov pri abrazívnom opotrebení používa metóda zisťovania odolnosti materiálov proti abrazívnemu opotrebeniu na brúsnom plátne.

Vzhľadom na to, že táto metóda sa používa často, je normalizovaná normou STN 01 5084. V tejto norme sú uvedené parametre skúšobných vzoriek, ako aj postupy a podmienky, ktoré je potrebné pri skúške dodržať, aby boli výsledky porovnateľné.

3.3.2.1 Zariadenie na skúšky odolnosti proti abrazívnemu opotrebeniu

Experimenty budú uskutočnené na skúšobnom zariadení na zisťovanie odolnosti proti abrazívnemu opotrebeniu na brúsnom plátne, ktoré je k dispozícii na Katedre kvality a strojárskych technológií TF SPU v Nitre (obr. 18).

Zariadenie sa skladá z oceľovej kruhovej platne, na ktorú sa pripevňuje brúsne plátno v tvare kruhu s priemerom 480 mm. Táto platňa je prostredníctvom prevodov spojená s pohonnou jednotkou (elektromotorom), ktorá zabezpečuje otáčavý pohyb platne. Skúšobná vzorka sa upína do držiaka a k brúsnemu plátneu je pritláčaná závažím tak, aby bol zabezpečený merný tlak v predpísanom rozsahu.

Držiak skúšobnej vzorky sa vkladá do unášača pevne pripevneného k pohybovej skrutke, ktorá zabezpečuje radiálny posuv skúšobnej vzorky. Koncové polohy držiaka

sú istené koncovými vypínačmi. Skúšobné teleso sa počas skúšky posúva od stredu ku kraju brúsneho plátna (alebo naopak), pričom dotyková plocha skúšobnej vzorky je neustále v styku s nepoužitým brúsnym plátnom. Dĺžka trecej dráhy, ktorú vykoná skúšobná vzorka počas skúšky je 50 m. Maximálna klzná rýchlosť skúšobného telesa je $0,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.



Obr. 18 Zariadenie na skúšanie odolnosti proti abrazívnemu opotrebeniu na brúsnom plátne

3.3.2.2 Postup pri skúške odolnosti proti abrazívnemu opotrebeniu

Pred skúškou sa odmerajú hmotnosti m_0 všetkých skúšobných vzoriek s presnosťou na 10^{-4} g. Meranie hmotnosti bude uskutočnené na váhe Precisa 205 A. Zistené hodnoty sa zapíšu do tabuľky.

Na kruhovú vodorovnú dosku sa pripevní brúsne plátno. Pre každú vzorku sa použije nové brúsne plátno, aby boli zabezpečené rovnaké podmienky pri skúške. Skontroluje sa, či je unášač v krajnej polohe (v strede vodorovnej dosky, alebo na jej okraji). Skúšobná vzorka sa upevní do držiaka. Držiak sa vloží do unášača a zaťaží sa závažím tak, aby bolo vyvolané zaťaženie $0,32 \text{ N}\cdot\text{mm}^{-2}$ prierezu vzorky. Zariadenie sa uvedie do chodu, pričom po prejení príslušnej dráhy koncový vypínač automaticky vypne chod zariadenia.

Po vypnutí chodu zariadenia sa vyberie držiak skúšobnej vzorky z unášača a unášač sa presunie do začiatkovej polohy. Vzorka sa vyberie z držiaka a odmeria sa jej

hmotnosť po skúške m_1 . Zistené hodnoty hmotnosti vzoriek po skúške sa zapisujú do tabuľky.

Pri skúške bude použité také poradie skúšobných vzoriek, že prvá skúšobná vzorka bude z etalónového materiálu. Po nej budú nasledovať vzorky jednotlivých tvrdováravých materiálov. V takomto striedavom poradí sa bude postupovať, pokiaľ nebudú premerané všetky skúšobné vzorky.

3.3.2.3 Vyhodnotenie skúšky pomernej odolnosti proti abrazívnemu opotrebeniu

Zo zistených hodnôt hmotností skúšobných vzoriek pred skúškou a po skúške sa určujú hmotnostné úbytky Δm a určujú sa priemerné hodnoty hmotnostných úbytkov pre jednotlivé skúšané materiály. Získané hodnoty sa zapisujú do tabuľky.

Aby bolo možné určiť presnú hodnotu pomernej odolnosti proti abrazívnemu opotrebeniu, je potrebné určiť aj mernú hmotnosť jednotlivých skúšaných materiálov a etalónu. Hodnota mernej hmotnosti materiálov bude vypočítaná podľa vzorca

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (1)$$

kde:

ρ – merná hmotnosť materiálu ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$),

m – hmotnosť vzorky materiálu (g),

V – objem vzorky materiálu (cm^3).

Na určenie mernej hmotnosti materiálov je potrebné poznať hmotnosť určitého množstva daného materiálu (napr. vzorky) a jeho objem. V prípadoch, keď sú vzorky pre skúšku odolnosti proti abrazívnemu opotrebeniu na brúsnom plátne vyrobené zo skúšaného materiálu (napr. u etalónového materiálu), je možné na určenie mernej hmotnosti použiť tieto vzorky.

V prípade tvrdonávarových materiálov sa pre skúšku na brúsnom plátne na jeden koniec vzorky, vyrobenej z bežného konštrukčného materiálu, nanáša vrstva tvrdonávaru (pozri kap. 3.2). Preto je potrebné pre určenie mernej hmotnosti tvrdonávaru vyrobiť zvlášť vzorky. Z tohto dôvodu sa pri výrobe vzoriek pre skúšku na brúsnom plátne v šablóne (kap. 3.2) vytvorí návar s presahom od kolíkov o približne

20 mm. Tým bude zaručené, že vzorka na určenie mernej hmotnosti tvrdonávaru bude mať rovnakú štruktúru a vlastnosti ako tvrdonávar skúšaný na brúsnom plátne.

Základný materiál šablóny bude následne odobraný pomocou rovinatej brúsky, čím vzniknú vzorky s rozmermi približne 10 x 10 x 3 mm. Uvedeným spôsobom budú vyrobené 3 vzorky. Na každej vzorke budú odmerané jej rozmery a hmotnosť a podľa vzorca (1) budú vypočítané hodnoty mernej hmotnosti skúmaných tvrdonávarových materiálov.

Následne sa vypočíta hodnota pomernej odolnosti proti abrazívnemu opotrebeniu podľa vzorca:

$$\psi_{abr} = \frac{\Delta V_E}{\Delta V} = \frac{\Delta \bar{m}_E}{\Delta \bar{m}} \cdot \frac{\rho}{\rho_E} \quad (2)$$

kde:

ψ_{abr} – pomerná odolnosť proti opotrebeniu (-),

ΔV_E – priemerný objemový úbytok etalónových skúšobných telies (mm^3),

ΔV – priem. objemový úbytok skúšobných telies zo skúšaného materiálu (mm^3),

$\Delta \bar{m}_E$ – priemerný hmotnostný úbytok etalónových skúšobných telies (g),

$\Delta \bar{m}$ – priemerný hmotnostný úbytok skúšobných telies skúšaného materiálu (g),

ρ_E – merná hmotnosť etalónového materiálu (g.cm^{-3}),

ρ – merná hmotnosť skúšaného materiálu (g.cm^{-3}).

Zistené hodnoty pomernej odolnosti proti abrazívnemu opotrebeniu pre jednotlivé skúšané materiály sa zapisujú do tabuľky a následne budú štatisticky vyhodnotené.

4 Výsledky práce

4.1 Určenie mernej hmotnosti skúšaných materiálov

Na určenie mernej hmotnosti etalónového materiálu 12014.2 boli použité vzorky, ktoré boli neskôr skúšané na brúsnom plátne. Tieto vzorky mali tvar valca. Pomocou mikrometra boli odmerané hodnoty priemerov a dĺžok týchto vzoriek s presnosťou na 0,01 mm. Hodnoty rozmerov a z nich vypočítané objemy jednotlivých vzoriek etalónového materiálu sú uvedené v tab. 4.

Hmotnosť jednotlivých vzoriek etalónového materiálu bola odmeraná pomocou váhy Precisa 205 A s presnosťou 10^{-4} g. Namerané hodnoty hmotnosti vzoriek etalónového materiálu sú uvedené v tab. 4.

Tab. 4 Hodnoty hmotnosti, objemu a mernej hmotnosti etalónového materiálu 12014.2

Por. číslo vzorky	Hmotnosť vzorky m (g)	Rozmery vzorky		Objem vzorky V (mm ³)	Merná hmotnosť vzorky ρ (g.cm ⁻³)
		priemer d (mm)	výška c (mm)		
1	34,3854	10,01	55,10	4336,203	7,9298
2	34,7102	10,05	55,05	4366,961	7,9484
3	34,2455	10,03	54,98	4344,067	7,8833
Priemerná hodnota mernej hmotnosti etalónového materiálu $\bar{\rho}_E$ (g.cm⁻³)					7,9205
Smerodajná odchýlka mernej hmotnosti etalónového materiálu σ_E (g.cm⁻³)					0,0274

Na určenie mernej hmotnosti tvrdonávarových materiálov boli použité zvyšné časti tvrdonávarov zo šablóny, ktoré boli brúsením vytvarované do tvaru hranola s rozmermi 10 mm x 5 mm x 2 mm. Z každej šablóny sa podarilo odobrať dve vzorky.

Rozmery vzoriek boli odmerané pomocou mikrometra s presnosťou na 0,01 mm. Namerané hodnoty rozmerov vzoriek a z nich vypočítané hodnoty objemov pre jednotlivé tvrdonávarové materiály sú uvedené v tab. 5 – 7.

Následne boli odmerané hmotnosti jednotlivých vzoriek pomocou váhy Precisa 205 A s presnosťou 10^{-4} g. Namerané hodnoty hmotnosti vzoriek tvrdonávarových materiálov sú uvedené v tab. 5 - 7.

Podľa vzorca (1) boli potom vypočítané hodnoty merných hmotností pre jednotlivé vzorky, ako aj priemerné hodnoty merných hmotností skúmaných materiálov. Ich vypočítané hodnoty pre jednotlivé materiály sú uvedené v tab. 5 - 7.

Tab. 5 Hodnoty hmotnosti, objemu a mernej hmotnosti materiálu NP 52

Por. čís. vzorky	Hmotnosť vzorky m (g)	Rozmery vzorky			Objem vzorky V (mm ³)	Merná hmotnosť vzorky ρ (g.cm ⁻³)
		dĺžka a (mm)	šírka b (mm)	výška c (mm)		
1	0,7418	10,03	5,07	2,02	102,7212	7,2215
2	0,7362	9,93	5,05	1,98	99,2901	7,4146
Priemerná hodnota mernej hmotnosti materiálu NP 52 $\bar{\rho}_{NP52}$ (g.cm ⁻³)						7,3180
Smerodajná odchýlka mernej hmotnosti materiálu NP 52 σ_{NP52} (g.cm ⁻³)						0,0966

Tab. 6 Hodnoty hmotnosti, objemu a mernej hmotnosti materiálu NP 58

Por. čís. vzorky	Hmotnosť vzorky m (g)	Rozmery vzorky			Objem vzorky V (mm ³)	Merná hmotnosť vzorky ρ (g.cm ⁻³)
		dĺžka a (mm)	šírka b (mm)	výška c (mm)		
1	0,7712	10,04	4,97	2,00	99,7976	7,7276
2	0,7924	10,03	5,05	2,08	105,3551	7,5212
Priemerná hodnota mernej hmotnosti materiálu NP 58 $\bar{\rho}_{NP58}$ (g.cm ⁻³)						7,6244
Smerodajná odchýlka mernej hmotnosti materiálu NP 58 σ_{NP58} (g.cm ⁻³)						0,1032

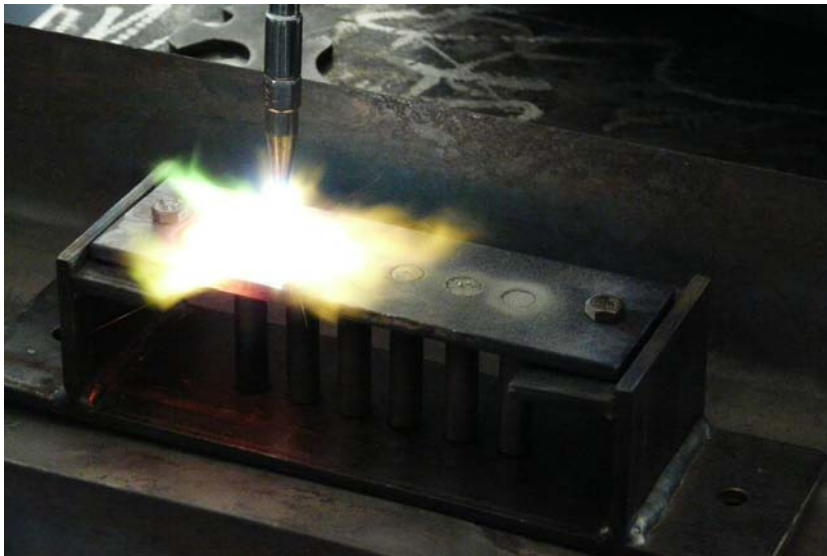
Tab. 7 Hodnoty hmotnosti, objemu a mernej hmotnosti materiálu NP 62

Por. čís. vzorky	Hmotnosť vzorky m (g)	Rozmery vzorky			Objem vzorky V (mm ³)	Merná hmotnosť vzorky ρ (g.cm ⁻³)
		dĺžka a (mm)	šírka b (mm)	výška c (mm)		
1	0,8014	10,00	5,03	2,01	101,1030	7,9266
2	0,8125	10,03	5,03	2,04	102,9198	7,8944
Priemerná hodnota mernej hmotnosti materiálu NP 62 $\bar{\rho}_{NP62}$ (g.cm ⁻³)						7,9105
Smerodajná odchýlka mernej hmotnosti materiálu NP 62 σ_{NP62} (g.cm ⁻³)						0,0160

Merné hmotnosti skúmaných tvrdonávarových materiálov sú veľmi podobné. Rozpätie ich priemerných hodnôt dosahuje hodnotu $0,5925 \text{ g.cm}^{-3}$. Veľmi podobné hodnoty merných hmotností sú spôsobené podobným chemickým zložením skúmaných materiálov (pozri tab. 3). Je viditeľný vplyv obsahu chrómu na hodnotu mernej hmotnosti.

4.2 Skúška odolnosti proti abrazívnemu opotrebeniu na brúsnom plátne

Príprava vzoriek pre skúšku vybraných tvrdonávarových materiálov na brúsnom plátne prebehla podľa postupu uvedeného v kap. 3.2. Vzorky pre jednotlivé materiály boli navárané v jednej šablóne (obr. 19). Po vychladnutí bola šablóna rozrezaná pomocou pásovej píly a obrúsená na brúske do tvaru valca s priemerom 10 mm. Navarené konce skúšobných vzoriek boli zabrúsené do roviny na rovinatej brúske tak, aby vrstva tvrdonávaru bola minimálne 2 mm. Pre každý materiál bolo vytvorených šesť vzoriek, pričom na meranie na brúsnom plátne sa použili iba tri vzorky.



Obr. 19 Príprava vzoriek v šablóne pre naváranie

Na pracovnej ploche každej vzorky tvrdonávarových materiálov bola odmeraná hodnota tvrdosti podľa Rockwella HRC. Tvrdosť vzoriek etalónového materiálu bola meraná podľa Vickersa HV 30. Namerané hodnoty tvrdostí a ich priemerné hodnoty pre jednotlivé materiály a režimy navárania sú uvedené v tab. 8 - 14. Grafické znázornenie hodnôt tvrdosti jednotlivých materiálov je uvedené na obr. 20.

Skúšky na zistenie pomernej odolnosti proti abrazívnemu opotrebeniu skúmaných materiálov na brúsnom plátne boli vykonané podľa postupu uvedeného v kap. 3.3.2. Pri skúškach bolo použité korundové brúsne plátno so zrnitosťou 120.

Najprv boli odmerané hmotnosti všetkých skúšobných vzoriek pred skúškou pomocou váhy Precisa 205 A s presnosťou 10^{-4} g. Tieto hodnoty sú uvedené v tab. 8 – 14.

Na zariadení na skúšky odolnosti proti abrazívnemu opotrebeniu, ktoré je k dispozícii na Katedre kvality a strojárskych technológií TF SPU v Nitre, boli postupne vyskúšané všetky vzorky tvrdonávarových materiálov a etalónového materiálu. Každá vzorka bola skúšaná na novom plátne. Po každej skúške bola odmeraná hodnota hmotnosti skúšobnej vzorky rovnakým spôsobom ako pred skúškou. Hodnoty hmotností skúšobných vzoriek po skúške sú uvedené v tab. 8 – 14.

Zo zistených hmotností skúšobných vzoriek pred skúškou a po skúške boli vypočítané hmotnostné úbytky. Boli tiež určené priemerné hodnoty hmotnostných úbytkov pre jednotlivé skúmané materiály. Zistené hodnoty sú uvedené v tab. 8 - 14.

Nakoniec boli vypočítané hodnoty pomernej odolnosti proti abrazívnemu opotrebeniu podľa vzorca (2). Vypočítané hodnoty pre jednotlivé materiály sú uvedené v tab. 8 – 14. Grafické znázornenie hodnôt pomernej odolnosti jednotlivých materiálov proti abrazívnemu opotrebeniu je uvedené na obr. 21.

Tab. 8 Hodnoty hmotnostných úbytkov, tvrdosti a pomernej odolnosti proti abrazívnemu opotrebeniu etalónového materiálu 12014.2

Por. číslo vzorky	Tvrdosť vzorky HV 30	Hmotnosť vzorky pred skúškou m_0 (g)	Hmotnosť vzorky po skúške m_1 (g)	Hmotnostný úbytok Δm (g)
1	99	34,3854	34,0072	0,3782
2	108	34,7102	34,3290	0,3812
3	101	34,2455	33,8748	0,3707
Priemerná hodnota hmotnostných úbytkov etalónového materiálu $\Delta \bar{m}_E$ (g.cm ⁻³)				0,3767
Smerodajná odchýlka hmotnostných úbytkov etalónového materiálu σ_E (g.cm ⁻³)				0,0044
Priemerná hodnota tvrdosti etalónového materiálu HV 30				102,67
Pomerná odolnosť etalónového materiálu proti abrazívnemu opotrebeniu ψ_E				1,00

Tab. 9 Hodnoty hmotnostných úbytkov, tvrdosti a pomernej odolnosti proti abrazívnemu opotrebeniu materiálu NP 52 bez pretavenia

Por. číslo vzorky	Tvrdosť vzorky <i>HRC</i>	Hmotnosť vzorky pred skúškou m_0 (g)	Hmotnosť vzorky po skúške m_1 (g)	Hmotnostný úbytok Δm (g)
1	50,5	31,5520	31,2882	0,2638
2	46,0	31,7135	31,4521	0,2614
3	54,0	31,3658	31,1069	0,2589
Priemerná hodnota hmotnostných úbytkov materiálu NP 52 bez pretavenia $\Delta \bar{m}_{NP52}$ (g.cm ⁻³)				0,2614
Smerodajná odchýlka hmotnostných úbytkov materiálu NP 52 bez pretavenia σ_{NP52} (g.cm ⁻³)				0,0020
Priemerná hodnota tvrdosti materiálu NP 52 bez pretavenia HRC_{NP52}				50,17
Pomerná odolnosť materiálu NP 52 bez pretavenia proti abrazívnemu opotrebeniu ψ_{NP52}				1,33

Tab. 10 Hodnoty hmotnostných úbytkov, tvrdosti a pomernej odolnosti proti abrazívnemu opotrebeniu materiálu NP 58 bez pretavenia

Por. číslo vzorky	Tvrdosť vzorky <i>HRC</i>	Hmotnosť vzorky pred skúškou m_0 (g)	Hmotnosť vzorky po skúške m_1 (g)	Hmotnostný úbytok Δm (g)
1	55,5	31,7352	31,5105	0,2247
2	51,0	31,8899	31,6487	0,2412
3	57,5	31,4222	31,1896	0,2326
Priemerná hodnota hmotnostných úbytkov materiálu NP 58 bez pretavenia $\Delta \bar{m}_{NP58}$ (g.cm ⁻³)				0,2328
Smerodajná odchýlka hmotnostných úbytkov materiálu NP 58 bez pretavenia σ_{NP58} (g.cm ⁻³)				0,0067
Priemerná hodnota tvrdosti materiálu NP 58 bez pretavenia HRC_{NP58}				54,67
Pomerná odolnosť materiálu NP 58 bez pretavenia proti abrazívnemu opotrebeniu ψ_{NP58}				1,69

Tab. 11 Hodnoty hmotnostných úbytkov, tvrdosti a pomernej odolnosti proti abrazívnemu opotrebeniu materiálu NP 62 bez pretavenia

Por. číslo vzorky	Tvrdosť vzorky <i>HRC</i>	Hmotnosť vzorky pred skúškou m_0 (g)	Hmotnosť vzorky po skúške m_1 (g)	Hmotnostný úbytok Δm (g)
1	69	32,6024	32,5751	0,0273
2	66	32,2510	32,2295	0,0215
3	67	32,4781	32,4516	0,0264
Priemerná hodnota hmotnostných úbytkov materiálu NP 62 bez pretavenia $\Delta \bar{m}_{NP62}$ (g.cm ⁻³)				0,0251
Smerodajná odchýlka hmotnostných úbytkov materiálu NP 62 bez pretavenia σ_{NP62} (g.cm ⁻³)				0,0026
Priemerná hodnota tvrdosti materiálu NP 62 bez pretavenia HRC_{NP62}				67,33
Pomerná odolnosť materiálu NP 62 bez pretavenia proti abrazívnemu opotrebeniu ψ_{NP62}				14,99

Tab. 12 Hodnoty hmotnostných úbytkov, tvrdosti a pomernej odolnosti proti abrazívnemu opotrebeniu materiálu NP 52 s pretavením

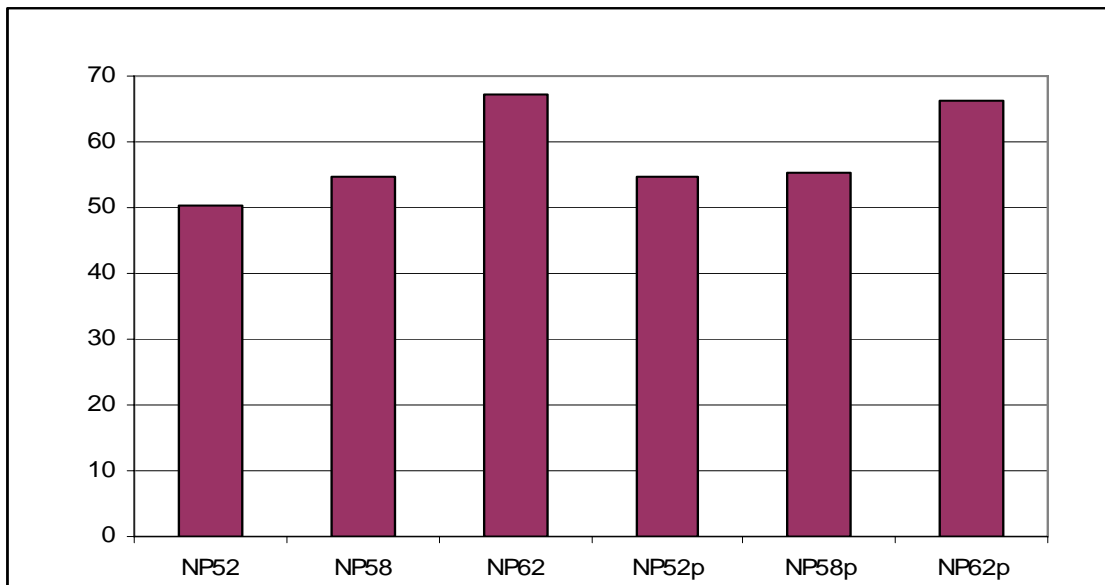
Por. číslo vzorky	Tvrdosť vzorky <i>HRC</i>	Hmotnosť vzorky pred skúškou m_0 (g)	Hmotnosť vzorky po skúške m_1 (g)	Hmotnostný úbytok Δm (g)
1	56,5	31,7161	31,5296	0,1865
2	53,0	31,3672	31,1596	0,2076
3	55,0	31,8437	31,6512	0,1925
Priemerná hodnota hmotnostných úbytkov materiálu NP 52 s pretavením $\Delta \bar{m}_{NP52p}$ (g.cm ⁻³)				0,1955
Smerodajná odchýlka hmotnostných úbytkov materiálu NP 52 s pretavením σ_{NP52p} (g.cm ⁻³)				0,0089
Priemerná hodnota tvrdosti materiálu NP 52 s pretavením HRC_{NP52p}				54,83
Pomerná odolnosť materiálu NP 52 s pretavením proti abrazívnemu opotrebeniu ψ_{NP52p}				1,78

Tab. 13 Hodnoty hmotnostných úbytkov, tvrdosti a pomernej odolnosti proti abrazívnemu opotrebeniu materiálu NP 58 s pretavením

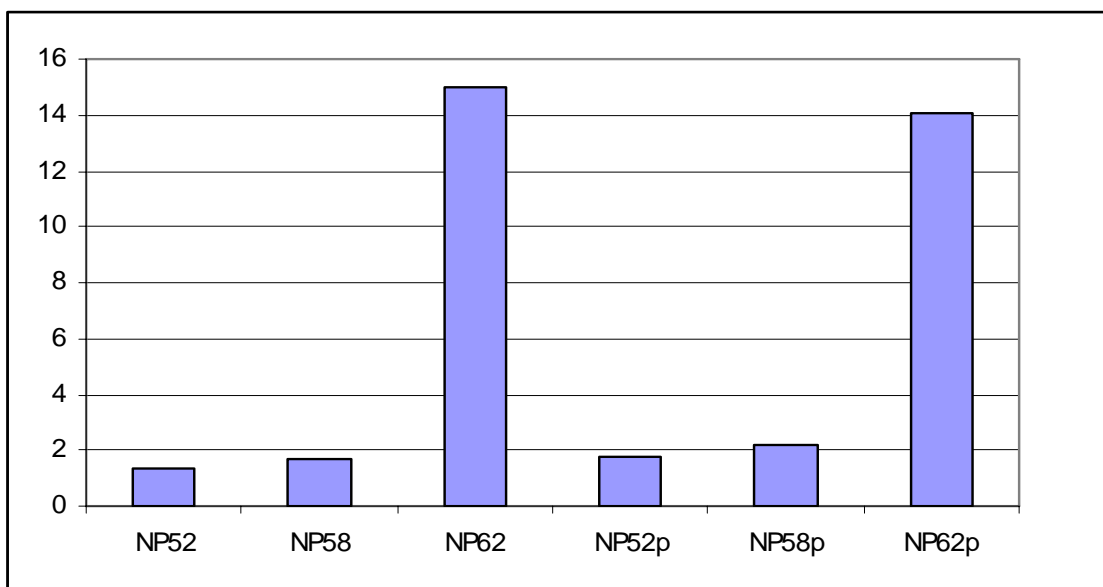
Por. číslo vzorky	Tvrdoť vzorky <i>HRC</i>	Hmotnosť vzorky pred skúškou m_0 (g)	Hmotnosť vzorky po skúške m_1 (g)	Hmotnostný úbytok Δm (g)
1	54,0	32,5010	32,3305	0,1705
2	53,5	32,6528	32,4978	0,1550
3	58,0	32,4097	32,2466	0,1631
Priemerná hodnota hmotnostných úbytkov materiálu NP 58 s pretavením $\Delta \bar{m}_{NP58p}$ (g.cm ⁻³)				0,1629
Smerodajná odchýlka hmotnostných úbytkov materiálu NP 58 s pretavením σ_{NP58p} (g.cm ⁻³)				0,0063
Priemerná hodnota tvrdosti materiálu NP 58 s pretavením HRC_{NP58p}				55,17
Pomerná odolnosť materiálu NP 58 s pretavením proti abrazívnemu opotrebeniu ψ_{NP58p}				2,23

Tab. 14 Hodnoty hmotnostných úbytkov, tvrdosti a pomernej odolnosti proti abrazívnemu opotrebeniu materiálu NP 62 s pretavením

Por. číslo vzorky	Tvrdoť vzorky <i>HRC</i>	Hmotnosť vzorky pred skúškou m_0 (g)	Hmotnosť vzorky po skúške m_1 (g)	Hmotnostný úbytok Δm (g)
1	66,0	32,3067	32,2790	0,0277
2	68,0	32,5484	32,5262	0,0222
3	65,0	32,5288	32,4984	0,0304
Priemerná hodnota hmotnostných úbytkov materiálu NP 62 s pretavením $\Delta \bar{m}_{NP62p}$ (g.cm ⁻³)				0,0268
Smerodajná odchýlka hmotnostných úbytkov materiálu NP 62 s pretavením σ_{NP62p} (g.cm ⁻³)				0,0034
Priemerná hodnota tvrdosti materiálu NP 62 s pretavením HRC_{NP62p}				66,33
Pomerná odolnosť materiálu NP 62 s pretavením proti abrazívnemu opotrebeniu ψ_{NP62p}				14,04



Obr. 20 Hodnoty tvrdosti skúmaných materiálov



Obr. 21 Hodnoty odolnosti proti opotrebeniu skúmaných materiálov

Z obr. 21 vyplýva, že materiál NP 62 dosiahol výrazne vyššiu hodnotu odolnosti proti opotrebeniu oproti materiálom NP 52 a NP 58, a to aj bez pretavenia aj s pretavením. Tieto hodnoty sú približne desaťnásobne vyššie. Z porovnania chemického zloženia skúmaných materiálov vyplýva, že výrazný nárast odolnosti proti opotrebeniu u materiálu NP 62 pravdepodobne je spôsobený vyšším obsahom uhlíka

a chrómu. V štruktúre preto vzniká väčšie množstvo veľmi tvrdých častíc karbidu chrómu. Ich prítomnosť tiež spôsobuje zvýšenie tvrdosti u materiálu NP 62 až na hodnoty blížiac sa 70 *HRC*. Rozdiel odolností proti opotrebeniu materiálu NP 62 oproti ostatným dvom je však oveľa väčší než rozdiel tvrdostí (obr. 20 a 21).

Z obr. 21 tiež jasne vyplýva pozitívny vplyv pretavenia na hodnoty odolnosti proti opotrebeniu u materiálov NP 52 a NP 58. V oboch prípadoch došlo k zväčšeniu odolnosti proti opotrebeniu o 25 %. U materiálu NP 62 došlo pri pretavení naopak k poklesu odolnosti proti opotrebeniu o 6 %.

Z hľadiska tvrdosti nanosených vrstiev je najlepší vplyv pretavenia viditeľný u materiálu NP 52 (obr. 20). Nárast tvrdosti po pretavení predstavuje 8,5 %. U materiálu NP 58 je nárast nepatrný a dosahuje hodnotu 1 %. U materiálu NP 62 tvrdosť po pretavení klesla o 1,5 %.

5 Diskusia

Diplomová práca sa zaoberala zisťovaním odolnosti tvrdých vrstiev vytvorených práškovými zliatinami na báze NiCrBSi proti abrazívnemu opotrebeniu a vplyvu pretavovania na jej hodnoty.

Merania boli vykonané na zariadení pre skúšky odolnosti materiálov proti abrazívnemu opotrebeniu na brúsnom plátne, ktoré je k dispozícii na Katedre kvality a strojárskych technológií TF SPU v Nitre. Priebeh skúšky bol podľa normy STN 015084.

Určovaniu hodnôt pomernej odolnosti proti opotrebeniu predchádzalo určenie hodnôt merných hmotností skúmaných tvrdonávarových materiálov a etalónového materiálu. Merná hmotnosť etalónového materiálu (oceľ 12014.2) bola určená na skúšobných vzorkách neskôr použitých pre skúšku odolnosti proti abrazívnemu opotrebeniu. Tieto vzorky majú valcový tvar s priemerom 10 mm. Zo skúšaných práškových zliatin je obtiažne vyrobiť valcové skúšobné vzorky. Navyše z týchto materiálov neboli vyrobené celé vzorky pre skúšku na brúsnom plátne, ale bola nanosená pomocou kyslíkovo-acetylénového plameňa iba určitá vrstva na nosný materiál valcového tvaru. Preto boli na určovanie mernej hmotnosti skúmaných práškových zliatin použité zvyšky po návare vzoriek pre skúšku na brúsnom plátne. Tým bolo zaručené, že tieto vzorky budú mať rovnakú štruktúru a vlastnosti.

Merné hmotnosti skúmaných materiálov sú veľmi podobné. Rozdiel medzi najväčšou priemernou hodnotou mernej hmotnosti (NP 62) a najmenšou priemernou hodnotou mernej hmotnosti (NP 52) je iba $0,5925 \text{ g.cm}^{-3}$, čo je približne 7,5 %. Je viditeľný vplyv obsahu chrómu na hodnotu mernej hmotnosti. Podobným spôsobom zisťovala hodnoty mernej hmotnosti práškového tvrdonávarového materiálu NP 52 aj Kozárová (2007). Ňou zistená hodnota bola $7,3389 \text{ g.cm}^{-3}$. Je to hodnota veľmi blízka hodnote zistenej v tomto experimente.

Čo sa týka pomernej odolnosti proti opotrebeniu, najväčšiu hodnotu dosiahol materiál NP 62. Táto hodnota bola niekoľkonásobne vyššia, než u ostatných materiálov. Takáto vysoká hodnota je prekvapujúca a nie je porovnateľná so žiadnym dostupným údajom pre práškové materiály na báze NiCrBSi (pozri kap. 1.5.6). Z porovnania chemického zloženia vyplýva, že takýto nárast hodnoty odolnosti proti abrazívnemu opotrebeniu mohol byť spôsobený vyšším obsahom uhlíka a chrómu.

Najmenšiu hodnotu ψ_{abr} dosiahol, podľa očakávania, materiál NP 52. Je to hodnota iba 1,33. Táto hodnota je porovnateľná s hodnotou, ktorú zistila pre daný materiál NP 52 vo svojej práci Kozárová (2007).

Z dosiahnutých výsledkov vyplýva, že následné pretavenie nanosených vrstiev kyslíkovo-acetylenovým plameňom môže priniest určitý nárast pomernej odolnosti proti opotrebeniu. Najväčší nárast bol dosiahnutý u materiálu NP 52 a to až 25 %. Naopak u materiálu NP 62 nastal po pretavení pokles odolnosti proti opotrebeniu.

6 Návrh na využitie výsledkov

Výber vhodného tvrdonávarového materiálu pre rôzne priemyselné aplikácie je možné uskutočniť iba vtedy, keď sú k dispozícii údaje o ich vlastnostiach vyjadrujúcich správanie sa týchto materiálov v rôznych podmienkach. Veľmi častou aplikáciou tvrdých vrstiev sú prostredia, v ktorých prebieha abrazívne opotrebenie strojov. Preto je dôležité skúmať vlastnosti materiálov zodpovedajúce tomuto druhu opotrebenia. Vlastnosťou, ktorá najlepšie vystihuje správanie sa materiálu v uvedených podmienkach, je odolnosť proti abrazívnemu opotrebeniu. Na základe hodnôt odolnosti proti abrazívnemu opotrebeniu je možné veľmi jednoducho a efektívne porovnávať jednotlivé materiály a zisťovať ich vhodnosť pre aplikácie v abrazívnom prostredí.

Z dosiahnutých výsledkov vyplýva, že výrazne najvyššiu odolnosť proti opotrebeniu v abrazívnom prostredí dosiahol materiál NP 62. Vysoké hodnoty odolnosti proti abrazívnemu opotrebeniu možno pripísať vyššiemu obsahu uhlíka a chrómu. Ostatné materiály dosiahli iba priemerné hodnoty odolnosti proti abrazívnemu opotrebeniu, takže ich aplikácia neprinesie výrazné zvýšenie životnosti súčiastok.

7 Záver

Na zníženie intenzity opotrebenia súčiastok pracujúcich v prostredí s abrazívnym pôsobením je potrebné ich povrch upravovať tak, aby získal zvýšenú odolnosť proti opotrebeniu. Jedným z mnohých spôsobov takýchto úprav je nanášanie práškových tvrdonávarových materiálov. Na posúdenie vhodnosti materiálov pre použitie v prostredí s abrazívnym opotrebením, je potrebné poznať vlastnosti týchto materiálov, ktoré charakterizujú odolnosť proti abrazívnemu opotrebeniu. Preto cieľom diplomovej práce bolo zistiť hodnoty pomernej odolnosti proti abrazívnemu opotrebeniu vybraných druhov práškových tvrdonávarových materiálov a možnosti ich ovplyvňovania následným pretavením. Všetky skúmané tvrdonávarové materiály boli samotroskotvorné práškové prídavné materiály na báze NiCrBSi s rôznym chemických zložením. Príprava vzoriek prebiehala v prípravku na prípravu vzoriek pre skúšku na brúsnom plátne, ktorý zaručuje rovnomernosť štruktúry a vlastností všetkých vzoriek.

Merania boli vykonané na zariadení pre skúšky odolnosti materiálov proti abrazívnemu opotrebeniu na brúsnom plátne. Pri skúške boli dodržané všetky podmienky predpísané normou STN 015084.

Na čo najpresnejšie určenie hodnôt pomernej odolnosti proti opotrebeniu bolo potrebné určiť hodnoty merných hmotností skúmaných materiálov. Hodnota mernej hmotnosti etalónového materiálu bola určená na skúšobných vzorkách pre skúšku odolnosti proti abrazívnemu opotrebeniu. Pretože z tvrdonávarov neboli vyrobené celé skúšobné vzorky pre skúšku odolnosti proti abrazívnemu opotrebeniu, boli hodnoty mernej hmotnosti týchto materiálov zisťované na špeciálnych vzorkách. Tieto vzorky boli odobraté zo šablóny po nanosení jednotlivých materiálov.

Najvyššiu hodnotu pomernej odolnosti proti abrazívnemu opotrebeniu spomedzi daných materiálov dosiahol tvrdonávar NP 62. Dosiadnutá hodnota bola prekvapujúco vysoká (viac než 14) a to aj v režime bez pretavenia, aj po pretavení. Tieto vysoké hodnoty možno pripísať vyššiemu obsahu uhlíka a chrómu. Tento materiál dosiahol aj oveľa vyššie hodnoty tvrdosti (o viac než 10 HRC), než ostatné skúmané materiály. Na tomto materiáli sa pozitívny vplyv pretavenia na výsledné vlastnosti neprejavil. Dokonca boli zaznamenané nižšie hodnoty tvrdosti a pomernej odolnosti proti opotrebeniu oproti materiálu bez pretavenia.

Najnižšiu hodnotu pomernej odolnosti proti abrazívnemu opotrebeniu spomedzi skúšaných materiálov dosiahol materiál NP 52. Tento materiál dosiahol aj najnižšie

hodnoty tvrdosti. U materiálov NP 52 a NP 58 sa najviac prejavil pozitívny vplyv pretavenia na výsledné vlastnosti povlakov. Hodnota pomernej odolnosti proti opotrebeniu vzrástla u oboch materiálov po pretavení až o 25 % oproti hodnote bez pretavenia.

8 Použitá literatura

- AMBROŽ, O., KAŠPAR, J. 1990. *Žárové nástřiky a jejich průmyslové využití*. Praha : SNTL, 1990, 320 s. ISBN 80-03-00347-4.
- AVUNDUK, A. S. 2006. *Laser Hardening of Metals*. [cit 2007-11-09]. Dostupné na internete: <http://www.uni-ulm.de/ilm/AdvancedMaterials/Presentation/AvunducLaserHardening.pdf>.
- BAJDA, M. 2006. *Plamenopráškové stavované povlaky a jejich praktické využití*. [cit 2008-03-10]. Dostupné na internete: <http://www.svarak.cz/cz/plamenopraskove-stavovane-povlaky-a-jejich-vyuziti-v-praxi.htm>.
- BHUSHAN, B., GUPTA, B. K. 1991. *Handbook of Tribology: Materials, coatings, and surface treatments*. New York : McGraw-Hill, 1991. 1168 s. ISBN 0-07-005249-2
- DAVIS, J. R. 2001. *Surface Engineering for Corrosion and Wear Resistance*. Materials Park : ASM International, 2001. 319 s. ISBN 0-87170-700-4
- FILIPENSKÝ, J. 2005. *Aplikace technologie žárového nástřiku v oblasti oprav a renovací a možnosti uplatnění ve sklářství*. [cit 2007-12-08]. Dostupné na internete: http://www.svarak.cz/Svařák_cz_applications_and_development_in_the_spheres_of_spraying_welding_and_surfacing.htm.
- HAMAR, J. 2008. *Žiarové striekanie a možnosti jeho využitia pri renovácii pôduspracujúcich nástrojov*. Bakalárska práca. Nitra : SPU, 2008. 52 s.
- HERMAN, P. 2006. *Materiály pro navařování a žárové nástřiky s obsahem wolframkarbidů*. [cit 2007-12-08]. Dostupné na internete: http://www.svarak.cz/Svařák_cz_applications_and_development_in_the_spheres_of_spraying_welding_and_surfacing.htm.
- HOUDKOVÁ, Š., BLÁHOVÁ, O., SVITÁKOVÁ, E. 2007. *Intendační lomová houževnatost žárových nástřiků*. [cit 2008-02-28]. Dostupné na internete: <http://skodavyskum.cz/projekty/tribologie/doc/ITF.pdf>.
- KNIEWALD, D., BAČOVÁ, V. 1997. Tribologické vlastnosti plazmovo stekac keramických povlakov. In *Kvalita a spoľahlivosť strojov '97*. Nitra : Slovenská poľnohospodárska univerzita, 1997. s. 191 – 194. ISBN 80-7137-375-3
- KNOTEK, O. 2001. Thermal Spraying and Detonation Gun Processes. In Bunshah, R. F. et al.: *Handbook of Hard Coatings. Deposition Technologies, Properties and Applications*. Park Ridge : Noyes Publications, 2001. 550 s. ISBN 0-8155-1438-7

-
- KOLEKTÍV AUTOROV. 2000. *Zváracie metódy a zariadenia. II. Diel učebných textov pre kurzy zvaračských technológov*. Ostrava : Zeross, 2000. 540 s. ISBN 80-85771-84-5
- KOZÁROVÁ, P. 2007. *Skúšanie tribologických vlastností práškových tvrdonávarových materiálov*. Diplomová práca. Nitra : SPU, 2007. 47 s.
- MARKO, M. – BALLA, J. 1982. *Prevádzková spoľahlivosť strojov III. Technológia a organizácia opráv*. Bratislava : Príroda, 1982, 240 s.
- MARKO, M. – BALLA, J. – SEČKÁR, P. 1975. Experimentálne výsledky odolnosti materiálov voči abrazívnemu opotrebovaniu. In *Acta technologica agriculturae XIV*, roč. 14, 1975, s. 59 – 69.
- MATEJKA, D., BENKO, B. 1988. *Plazmové striekanie kovových a keramických práškov*. Bratislava : ALFA, 1988. 271 s. ISBN 063-062-87.
- MIGUEL, J. M. et al. 2003. Tribological Study of NiCrBSi Coatings Obtained by Different Processes. In *Tribology International* 36 (2003) p. 181 – 187 [cit 2008-04-08]. Dostupné na internete: <<http://www.sciencedirect.com/locate/tribint>>.
- RAČKOVÁ, Š. et al. 2007. *Tribologické charakteristiky žárově stříkaných nástřiků*. [cit 2008-02-28]. Dostupné na internete: <<http://skodavyskum.cz/projekty/tribologie/doc/rackova.pdf>>.
- ROZDRÍGUEZ, X. et al. 2003. An Experimental Study of the Wear Performance of NiCrBSi Thermal Spray Coatings. In *Wear* 255 (2003) p. 950 – 955 [cit 2008-04-08]. Dostupné na internete: <<http://www.sciencedirect.com>>.
- SCHNEIDER, M. F. 1998. *Laser cladding (PhD Thesis)* [online]. Enschede : University of Twente, 1998. [cit 2008-03-15] 181 p. ISBN 90 365 1098 8. Dostupné na internete: <http://doc.utwente.nl/32040>.
- STN 01 5084 Stanovení odolnosti kovových materiálů proti abrazivnímu opotřebení na brusném plátně.
- STN EN ISO 6507: 1997. Kovové materiály. Skúška tvrdosti podľa Vickersa. Časť 1: Skúšobná metóda.
- STN EN ISO 6508-1: 2000. Kovové materiály. Skúška tvrdosti podľa Rockwella. Časť 1: Skúšobná metóda (stupnice A, B, C, D, E, F, G, H, K, T, N).
- STOKES, J. 2008. *Theory and Application of the High Velocity Oxy-Fuel (HVOF) Thermal Spray Process*. Dublin City University, 2008. ISBN 1-87232-753-2 [cit 2008-03-01]. Dostupné na internete: <<http://webpages.dcu.ie/~stokesjt/ThermalSpraying/Book/HVOFThermalSpraying.htm>>.
-

VESELKO, J. – SUDNIK, V. 1990. *Technológia zvarania*. Bratislava : Vydavateľstvo technickej a ekonomickej literatúry, 1990. 310. s. ISBN 80-05-00189-4.

VÝSKUMNÝ ÚSTAV ZVÁRAČSKÝ – PRIEMYSELNÝ INŠTITÚT SR. 2010. *Kovové prášky na nanášanie za tepla*. [cit 2010-04-05] Dostupné na internete: <http://www.vuz.sk/vyroba_pm_3_7_3.html>.

WACHTMAN, J. B. – HABER, R. A. 1993. *Ceramic Films and Coatings*. Park Ridge : Noyes Publications, 1993. 446 s. ISBN 0-8155-1318-6

WEGNER, A. 2004. *Thermisches Spritzen*. [cit 2008-04-04]. Dostupné na internete: <http://www.werkstoffe_korrosion.de/man_thermischesspritzen.pdf>.

9 Zoznam príloh

Príloha 1

CD médium – diplomová práca v elektronickej podobe