

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA STROJNÍ

Ústav strojírenské technologie

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Praha 2015

Kristýna Petelová

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA STROJNÍ

Ústav strojírenské technologie

**Termické nástřiky aplikované pro zvýšení
odolnosti proti opotřebení**

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Autor: Kristýna Petelová
Obor: Teoretický základ strojírenského inženýrství
Vedoucí práce: Prof. Ing. Jan Suchánek, CSc.
Praha 2015

Prohlášení

1. Prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci zpracovala samostatně a použila jsem pouze poklady uvedené v příloženém seznamu.
2. Souhlasím s tím, aby práce byla zpřístupněna pro studijní a výzkumné účely.

V Praze dne

.....

Podpis

Poděkování

Na tomto místě bych ráda poděkovala vedoucímu práce prof. Ing. Janu Suchánkovi, CSc. za vedení, pomoc a rady při zpracování bakalářské práce.

Chtěla bych také poděkovat rodině za podporu a pomoc při studiu.

Anotace

Bakalářská práce se zaměřuje na metody aplikace a typy termických nástřiků odolných proti opotřebení. V práci jsou uvedeny procesy opotřebení, kterým je nutné předejít. Práce dále uvádí výčet materiálů, které jsou odolné proti opotřebení. U materiálů jsou uvedeny mechanické vlastnosti, způsob nanášení a součásti, na které se materiál používá. Dále jsou popsány technologie termických nástřiků. U technologií jsou uvedeny parametry týkající se nástřiku. V závěru jsou tyto technologie zhodnoceny.

Abstract

This bachelor's thesis focuses on methods of application and types of wear resistant thermal sprays. In this thesis are listed processes of wear, which we need to eliminate. This thesis lists all materials, which are wear resistant. There are also listed mechanical properties of materials, type of application and mechanical components, where are materials used. Types of application thermal sprays are described. There are also listed parameters of application thermal sprays. Each technology of application of thermal sprays is evaluated.

Klíčová slova

Termické, žárové, nástřiky, opotřebení, odolnost, povlaky, aplikace

Keywords

Thermal, spray, wear, resistant, coatings, application

OBSAH

ÚVOD.....	1
1. PROCESY OPOTŘEBENÍ.....	2
2. MATERIÁLY PRO TERMICKÉ NÁSTŘIKY.....	4
2.1 TYPY MATERIÁLŮ.....	5
2.2 VLASTNOSTI MATERIÁLŮ.....	9
3. TECHNOLOGIE NANÁŠENÍ TERMICKÝCH NÁSTŘIKŮ....	13
3.1 NÁSTŘIK HVOF.....	14
3.2 NÁSTŘIK ELEKTRICKÝM OBLOUKEM.....	15
3.3 NÁSTŘIK PLAZMOU.....	16
3.4 NÁSTŘIK PLAMENEM.....	17
3.5 POROVNÁNÍ METOD ŽÁROVÝCH NÁSTŘIKŮ.....	19
ZÁVĚR.....	21
CITOVANÁ LITERATURA.....	22
SEZNAM OBRÁZKŮ.....	24
SEZNAM TABULEK.....	25
SEZNAM PŘÍLOH.....	26
PŘÍLOHY.....	27

Úvod

V bakalářské práci jsou popsány postupy a druhy materiálů nutné pro aplikaci termických neboli žárových nástřiků odolných proti opotřebení. Na začátku jsou uvedeny jednotlivé typy opotřebení a jejich vznik. V další části jsou vypsány typy materiálů, které odolávají jednotlivým druhům opotřebení. Jsou zde sepsány metody nanášení nejužívanějších materiálů. Práce obsahuje výčet strojních součástí, pro které se materiály odolné proti opotřebení používají. U materiálů jsou vypsány i jejich další mechanické vlastnosti. Dále jsou rozebrány metody nanášení termických nástřiků odolných proti opotřebení. Tabulky uvádějí technické údaje všech uvedených metod, potřebných pro volbu správné technologie žárového nástřiku. Poté následuje zhodnocení jednotlivých metod.

Termické nástřiky, či jinak žárové, jsou v dnešní době velmi oblíbené a často používané. Tyto povlaky jsou používány jak pro zlepšení povrchových vlastností u nových součástí, tak pro renovace součástí opotřebených. Použití povlaků odolných proti opotřebení může výrazně zvýšit životnost výrobků. Mnohdy je výhodnější opotřebené součásti zrenovovat, než kupovat nové. Některé ze žárových nástřiků navíc nevyžadují rozsáhlé předúpravy stříkaného povrchu.

Odolnost proti opotřebení dnes patří k základním požadavkům, kladeným na strojní součásti. Mnoho strojních součástí vykonává neustálý pohyb, který je doprovázen nejrůznějšími druhy opotřebení jako je abrazivní či erozivní.

Výběr povlakovacího materiálu záleží na typu materiálu pokladu, na množství kladených vrstev, na procentuelním zastoupení prvků v povlakovacím materiálu či na namáhání součástí. Velkou roli může při rozhodování hrát i cena povlakovacího zařízení či jeho provoz.

Povlaky odolné proti opotřebení se užívají na součástech například v letectví, kosmonautice, při výrobě výkonných leteckých a lodních motorů či podvozků letadel. Dále se užívají na úpravu třecích ploch kloubních implantátů ve zdravotnictví, na pístní kroužky u dieselových motorů, lopatky plynových turbín, lopatky kompresorů, statorů kompresorů a funkčních ploch ložisek. [3]

1. Procesy opotřebení:

Adhezivní opotřebení

Adhezivní opotřebení vzniká působením adhezních sil mezi povrchy, při styku dvou součástí, které jsou vůči sobě v pohybu. [3] Díky silám a plastickým deformacím jsou vytrhávány částičky materiálu nerovného povrchu, které se přenáší na povrch druhého materiálu. Častěji ulpívá materiál měkčí na materiálu tvrdším. [6] Tento typ opotřebení je většinou způsoben nedostatečným či špatným mazáním součástí. To se týká hlavně ložisek. [3]

Abrazivní opotřebení

Abrazivní opotřebení je založeno na znehodnocení povrchu materiálu díky tvrdým částicím, které se oddělují například při řezání nebo rýhování. Opotřebení se vyskytuje u interakce dvou součástí, které jsou vůči sobě v pohybu. Abrazivní částice jsou přítomny díky volnému přístupu okolního prostředí. Dále to mohou být částice samotných materiálů, které se oddělily v důsledku působení sil. Částice oddělené přímo od materiálu jsou zpevněny plastickou deformací a je pro ně jednodušší povrch opotřebit. [16]

Vibrační opotřebení (fretting)

Vibrační opotřebení je způsobeno vibracemi o malých amplitudách, kterým je těžké zabránit. Vibrace vznikají při kontaktu dvou nerovných povrchů. Vibrace vznikají také při klouzání povrchů nebo válcování. Díky vibracím se nejprve objevuje adhezivní opotřebení, které pozvolna přechází v abrazivní opotřebení. Opakované zatěžování a odlehčování součástí způsobuje na povrchu cyklické napětí. Toto napětí vyvolává nejrůznější praskliny jak na povrchu, tak pod ním. Povlaky musí být odolné proti oxidaci

za určitých teplot. Musí být tuhé a zároveň houževnaté, jinak opět hrozí abrazivní opotřebení. [3]

Erozivní opotřebení

Eroze je způsobena rychlým dopadem plynu nebo kapaliny na povrch tělesa a jejich následným oddělením od povrchu součástí. Kapalina i plyn mohou obsahovat nejrůznější částice, které při dopadu vedou k opotřebení. Při pohybu po povrchu s sebou kapalina či plyn může strhávat částice povlaku. Pokud je úhel dopadu tekutiny malý, je opotřebení spíše abrazivní. Pro úhly menší než 45° jsou proto potřeba povlaky tvrdší a pro úhly větší než 45° se hodí povlaky spíše měkčí a houževnatější. Materiál by měl být schopný dosáhnout plastické deformace. Povlaky odolné proti erozivnímu opotřebení se užívají zejména na lopatky turbín a lodní šrouby, kde je opotřebení způsobeno právě odtrháváním kapaliny od povrchu strojních součástí. [3]

Kavitační opotřebení

Kavitace je způsobena kolabováním bublin v kapalině. Plynové bubliny vznikají v kapalině díky lokálnímu poklesu tlaku. Při následném zvýšení tlaku bubliny zanikají. Kolabování bublin vytváří rázové vlny. Ty mají vliv na okolní materiál. Povrch je poté náchylnější k opotřebení. Materiály, odolné proti již výše zmíněnému vibračnímu opotřebení, jsou odolné i proti kavitaci. [3]

Únavové opotřebení

Únavové opotřebení je nahromadění nejrůznějších poruch v povrchu díky působení napětí. Napětí v povrchu je způsobeno opakovaným zatěžováním strojních součástí. Toto opotřebení se často objevuje u ozubení[3].

2. Materiály pro termické nástřiky

Termické nástřiky jsou nástřiky, které jsou aplikovány na povrch díky vysokým teplotám. Tyto vysoké teploty nataví částice materiálu. Roztavené částice jsou poté působením tlaku stlačeného média nanесeny na určenou součást.

Pro dosažení optimálních vlastností povlaku je nutné sledovat tyto parametry:

- teplota a výtoková rychlost média, povrchová teplota a distribuce rychlostních trajektorií částic prášku v proudu plazmatu
- tepelná bilance v plazmatu a přenos tepla z plazmatu do částic přídavného materiálu
- geometrie výbojového prostoru a umístění injektorů pro vstřikování prášku
- zrnitost, morfologie, chemické složení prášků přídavného materiálu
- volba okolní atmosféry reakčního prostoru s cílem vyvolání nebo zamezení sekundárních chemických reakcí v prášku
- tepelná bilance na povrchu a v objemu substrátu (ohřev, chlazení) [4]

Všechny tyto parametry umožňují určit výsledné vlastnosti povlaku jako přilnavost, morfologii, chemické složení, strukturní a tepelná vnitřní pnutí, tvrdost, porozitu a únavové chování. [4]

Vhodná povrchová teplota částic odpovídá teplotě tání. Jádro je uvedeno pouze do plastického stavu. Po dopadu se částice zploští. Takto zploštěná částice se nazývá splat. Souvisle se překrývající splaty tvoří na podkladu povlak s určitou pórovitostí. Pórovitost se většinou pohybuje od 5-20%. [13] Mechanické vlastnosti nástřiků jsou díky pórovitosti a zbytkovým pnutím odlišné od kompaktních materiálů o stejném složení. [1]

Je možné nanášet i vícevrstvé povlaky ze stejného materiálu nebo kombinované povlaky z různých materiálů. U těchto typů povlaků je důležité hlídat nežádoucí rozdíly mezi fyzikálně mechanickými vlastnostmi materiálu podkladu a povlaku. [14] Mezivrstvy v povlacích plní funkci bariéry. Dále umožňují plynulý přechod a rovnoměrné rozložení napětí ve vrstvách. Je to umožněno díky různým koeficientům teplotní roztažnosti. Například koeficient teplotní roztažnosti oceli použité jako podkladu ($\alpha=12-18 \cdot 10^{-6} / ^\circ\text{C}$) a keramiky použité jako povlaku ($\alpha=5,5-10 \cdot 10^{-6} / ^\circ\text{C}$). [4]

2.1 Typy materiálů

Hlavní materiály, které se používají na ochranu proti opotřebení, jsou sloučeniny oxidů nebo karbidů. Často používané materiály jsou například oxid chromu (Cr_2O_3), karbid wolframu s kobaltem (WC/Co), karbid wolframu s niklem (WC/Ni), karbid wolframu s kobaltem a chromem (WC/Co/Cr), karbid chromu s niklchromem (CrC/NiCr) a slitiny Co-Cr-Si-Mo v angličtině známé jako Tribaloy. [5] Nejčastější složení cermetů (WC) je 85-90% WC a 10-15%Co [4]. Využívají se zejména u ložisek a hřídelí vrtulníkových reduktorů. Vhodné jsou také pro lopatky kompresorů. [3, 8] Přídavné materiály na bázi oxidické keramiky jsou uvedeny v tabulce 10. Povlaky Al_2O_3 a Cr_2O_3 jsou velice odolné proti opotřebení. Materiály uvedené v tabulce 10 se nejčastěji dodávají v práškové formě či ve formě tyčinek. [7]

Karbid wolframu se používá u výrobků pracujících za nižších teplot například okolo 480 °C (900 °F). Karbid chromu se naopak používá u výrobků pracujících ve vyšších teplotách až do 815 °C (1500 °F).

Koncentrace prvků v karbidech se liší podle použití. Množství kobaltu v karbidu wolframu je přibližně od 11 do 18 hm. %. Množství NiCr v karbidu chromu je od 7 do 50 hm.%. [3] Čisté materiály se používají zřídka. Díky vysokým nárokům kladeným na povlaky jsou vhodnější nejrůznější směsi povlakovacích materiálů. Především z hlediska procentuálního zastoupení jednotlivých prvků ve směsi se mohou materiály nabízené firmami dosti lišit.

Materiály jsou dodávány ve formě prášku nebo drátu. Ve formě prášku se v dnešní době dají vyrobit všechny přídavné materiály a proto se tato forma užívá častěji. Ve formě drátu se naopak nedají vyrobit přídavné materiály na bázi keramik a speciální materiály jako například NiCrSiB. Dráty se dodávají v průměrech 1,6; 2; 2,5 a 3,15 mm. Způsob výroby prášku často ovlivňuje vlastnosti materiálu. [5]

Velikosti částic materiálů se pohybují od 5 μm do 130 μm . Poměr rozměrů částic, které jsou na sebe kolmé, by neměl přesahovat velikost 1 : 2 až 1 : 3. Pokud by byl poměr větší, částice by měly spíše podélný tvar na místo oválného. V podélném tvaru částice nelze dávkovat. [5]

Materiály odolné proti adhezivnímu opotřebení

Proti adhezivnímu opotřebení se používají měkčí povlaky. Měkké povlaky jsou výhodné zejména díky schopnosti pohltit částice brusiva, které jsou přítomny mezi povrchy součástí. Částice takto zarovnané v povlaku nejsou schopny opotřebit materiál. Povlak musí být dostatečně měkký na zachycení jednotlivých zrn brusiva, které jsou obsaženy v mazivu. Póry, které se u těchto povlaků přirozeně vyskytují, slouží jako zásobárny maziva. U těchto typů povlaků je nutné zaručit dostatečné mazání v průběhu užívání. Měkké povlaky mají zhoršenou odolnost proti abrazivnímu opotřebení. [3]

Měkké povlakovací materiály jako například babbitt, kompozit s příměsí olova nebo cínu, se používají především pro součásti hydraulických lisů a vodící kroužky u pístních tyčí. [3]

Tab. 1 Měkké povlakovací materiály a způsob nanášení [3]

Hliníkový bronz (Al, Cu)	OFW, EAW, OFP, PA, HVOF
Tobin bronz (63% Cu, 37% Zn, 0,3% Si, 0,15% Sn)	OFW, EAW
Babbitt (Sn, Cu, Sb)	OFW, EAW, OFP
Cín	OFW, EAW, OFP

OFW-oxyfuel wire spray- nástřik plamenem s drátem, OFP- oxyfuel powder spray- nástřik plamenem s práškem, EAW- electric arc wire spray- nástřik elektrickým obloukem, PA- plasma arc spray- nástřik plazmou, HVOF- high-velocity oxyfuel spray- vysokorychlostní nástřik

Tvrdé povlakovací materiály se používají zejména na součásti vyžadující větší odolnost proti opotřebení. Součásti s tvrdými povlaky není třeba příliš mazat. Vydrží i dočasný běh bez mazání. Tvrdé povlaky mají vysokou odolnost proti adhezivnímu opotřebení. Opotřebení se zvětšuje spolu s rostoucí teplotou. [3]

Tyto povlaky se užívají zejména na klikové hřídele děrovacích lisů, součásti strojů pro výrobu cukrové třtiny, kormidlová ložiska, oběžná kola hřídelí, pastorky, pístní kroužky a rotory palivových čerpadel. [3]

Tab. 2 Tvrdé povlakovací materiály a způsob nanášení [3]

Mo/Ni-Cr-B-Si	PA
Molybden	OFW, EAW, PA
Vysokouhlíkové oceli	OFW, EAW
Oxid titanu	OFP, PA
Oxid hliníku	OFP, PA
Karbid wolframu	OFP, PA, HVOF
Co-Mo-Cr-Si	PA, HVOF
Fe-Mo-C	PA

Materiály odolné proti abrazivnímu opotřebení

Materiály odolné proti abrazivnímu opotřebení se užívají např. u pístních tyčí čerpadel, u nasávacího potrubí v olejovém průmyslu a na míchačky na beton. [3]

Tab. 3 Materiály povlaků odolných proti abrazivnímu opotřebení a způsob nanášení [3]

Oxid hliníkový	PA
Oxid chromu	PA
Karbid wolframu	PA, HVOF
Karbid chromu	PA, HVOF
Ni-Cr-B-SiC/WC (tavený)	OFP, HVOF
Ni-Cr-B-SiC (tavený/ netavený)	OFP, HVOF

Oxid hliníku má tvrdost 900HV, karbid wolframu 1250HV, karbid chromu 1000HV a oxid chromu 1300HV. [10]
Karbid chromu se používá například pro vnější části spalovacích motorů. [3]

Materiály odolné proti vibračnímu opotřebení

Materiály odolné proti vibračnímu opotřebení se užívají například u hřídelí servomotorů, brusek a soustruhů. [3]

Tab. 4 Materiály povlaků odolných proti vibračnímu opotřebení a způsob nanášení [3]

Molybden	OFW, PA
Mo/Ni-Cr-B-SiC	PA
Co-Mo-Cr-Si	PA, HVOF
Korozivzdorná ocel AISI 420	EAW

Korozivzdorná ocel AISI 420 má tvrdost 40- 43HRC. [9]

Tab. 5 Materiály povlaků odolných proti vibračnímu opotřebení za malých teplot (<540°C) a způsob nanášení [3]

Hliníkový bronz	OFW, EAW, PA, HVOF
Cu-Ni-In	PA
Cu-Ni	PA, HVOF

Užití u letadlových konstrukcí, kompenzátorů a středních podpěr (části tryskových motorů). [3]

Tab. 6 Materiály povlaků odolných proti vibračnímu opotřebení za velkých teplot (>540°C) a způsob nanášení [3]

Co-Cr-Ni-W	PA, HVOF
Karbid chromu	PA, HVOF

Užívají se u kompresorových těsnění, u součástí větráků a pro výztuhy u tryskových motorů. [3]

Materiály odolné proti erozivnímu opotřebení

Tyto povlaky se užívají zejména na lopatky turbín a lodní šrouby, kde je toto opotřebení způsobeno právě odtrháváním kapaliny. Dále se tyto povlaky používají u odsávačů, hydroelektrických ventilů a zátek vypouštěcích ventilů. [3]

Tab. 7 Materiály povlaků odolných proti erozivnímu opotřebení a způsob nanášení [3]

Karbid chromu	PA, HVOF
Karbid wolframu	PA, HVOF
Oxid chromu	PA, HVOF
WC/Ni-Cr-B-SiC (tavený)	OFP, HVOF
WC/Ni-Cr-B-SiC (netavený)	PA

Materiály odolné proti kavitačnímu opotřebení

Užívají se u vodících kroužků hydraulických turbín, u trysk vodních turbín, k vedení válců diesellových motorů a u součástí čerpadel. [3]

Tab. 8 Materiály povlaků odolných proti kavitačnímu opotřebení a způsob nanášení [3]

Ni-Cr-B-SiC-Al-Mo	PA
Ni-Al/Ni-Cr-B-SiC	PA
Nerezová ocel 316	PA
Ni-Cr-B-SiC (tavený)	OFP, HVOF
Ni-Cr-B-SiC (netavený)	PA
Hliníkový bronz	PA, HVOF
Cu-Ni	PA, HVOF

2.2 Vlastnosti materiálů

Tab. 9 Vlastnosti vybraných povlakovacích materiálů odolných proti opotřebení [5]

Typ přídavného materiálu	Rozsah zrnitosti (μm)	Teplota tavení $^{\circ}\text{C}$	Tvrдость	Násypná hustota $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$
Cr-Ni-Si-B	40 až 120	950 až 1050	30-60 HRC	-
Cu-Al	-	1060	180 HB	-
NP 52 (0,5C,5Si,3,5B, 5Fe,14Cr,Ni)	-	-	48-54HRC	4,8

Tab. 10 Keramické materiály odolné proti opotřebení a jejich vlastnosti [5]

Typ přídavného materiálu	Rozsah zrnitosti (μm)	Teplota tavení ($^{\circ}\text{C}$)	Tvrдость	Násypná hustota ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	Vlastnosti povlaků
Oxid hliníku (Al_2O_3)	5,6 až 45	2050	2300HV	1,4 až 3,6	Odolnost proti opotřebení, elektroizolační vlastnosti
Oxid titanu (TiO_2)	5,6 až 45	1840	1600HV	1,5 až 2	Pro hladké povrchy, jako přísada pro oxid hliníku
Oxid chromu (Cr_2O_3)	5 až 63	2340	2000 až 2500HV	1,5 až 2,7	Odolnost proti korozi, relativní dobrá teplotní vodivost
Oxid chromu (Cr_2O_3) + Oxid titanu (TiO_2) 60/40	5,6 až 45	-	-	1,5 až 2,1	Odolnost proti korozi
Oxid hliníku (Al_2O_3) + Oxid titanu (TiO_2) 97/3	5 až 63	2030	2000 až 2500HV	1,3 až 2,2	Odolnost proti korozi, opotřebení, tepelným šokům, dobré el. izolační vlastnosti

Oxid hliníku (Al_2O_3) + Oxid titanu (TiO_2) 87/13	5 až 63	2020	2000 až 2400HV	1,3 až 2,2	Odolnost proti korozi, relativní vysoká tažnost a tvrdost
Oxid hliníku (Al_2O_3) + Oxid titanu (TiO_2) 60/40	5 až 63	1950	2000 až 2200HV	1,1 až 2,1	Odolnost proti korozi
Oxid hliníku (Al_2O_3) + Oxid chromu (Cr_2O_3) 98/2	5,6 až 63	2000	2300 až 2700HV	1,3 až 2,2	Odolnost proti opotřebení, dobrá tažnost
Oxid zirkonu (ZrO_2) + oxid vápníku (CaO) 95/5	5,6 až 45	2400	-	1,6 až 2,4	Odolnost proti opotřebení, dobrá tažnost
Oxid zirkonu (ZrO_2) + oxid vápníku (CaO) 90/10	5,6 až 45	2350	-	1,6 až 2,4	Odolnost proti opotřebení a oxidaci za tepla
Oxid zirkonu (ZrO_2) + oxid křemíku (SiO_2) 65/35	16 až 63	-	-	1,8 až 2,4	Odolnost proti kolísání teplot, odolnost proti erozivnímu a abrazivnímu opotřebení
Oxid chromu (Cr_2O_3) + Oxid titanu (TiO_2) + oxid křemíku (SiO_2) 92/3/5	5,6 až 63	-	-	1,6 až 2,4	Vysoká odolnost proti opotřebení, odolnost proti korozi a oxidaci povrchu
Oxid zirkonu (ZrO_2) + oxid hořčíku (MgO) 97/3	5,6 až 63	2130	-	1 až 1,9	Odolnost proti opotřebení a oxidaci povrchu za tepla

Tab. 11 Materiály na bázi neoxidické keramiky odolné proti opotřebení a jejich vlastnosti [5]

Typ přídavného materiálu	Rozsah zrnitosti (μm)	Teplota tavení ($^{\circ}\text{C}$)	Tvrдост	Vlastnosti
Karbid wolframu (WC)	5,6 až 90	2867	3300HV	Přísada do přídavných materiálů, vysoká tvrdost
Karbid chromu (Cr_3C_2)	5,6	1890	-	Odolnost proti korozi a oxidaci při vysokých teplotách
Karbid boru (B_4C)	-	2450	-	Vysoká tvrdost, žáruvzdornost do teploty 1000°C , pohlcuje záření neutronů
Karbid křemíku (SiC)	-	2700	-	Vysoká tvrdost, žáruvzdornost do teploty 1500°C
Karbid wolframu (WC) + karbid titanu (TiC) 85/15	5,6 až 63	3160	2080 až 3200 HV	Odolnost proti korozi

Tab. 12 Materiály na bázi neoxidické keramiky odolné proti opotřebení a jejich vlastnosti [5]

Typ přídavného materiálu	Rozsah zrnitosti (μm)	Teplota tavení ($^{\circ}\text{C}$)	Použití
Slitina niklu a hliníku 70/30	5,6 až 20	1600	Odolnost proti abrazivnímu a erozivnímu opotřebení, odolnost proti korozi, vhodná jako mezivrstva, odolnost proti působení vysokých teplot
Slitina niklu a titanu 60/40	5,6 až 20	1200	Odolnost proti abrazivnímu opotřebení, vhodná jako mezivrstva
Karbid wolframu (WC) +kobalt (Co) 94/6	5,6 až 45	-	Vysoká tvrdost povlaků, částečná odolnost proti korozi, odolnost proti abrazivnímu opotřebení
Karbid wolframu (WC) +kobalt (Co) 88/12	5,6 až 90	-	Odolnost proti opotřebení při nízkých teplotách, odolnost proti abrazivnímu a erozivnímu opotřebení
Karbid wolframu (WC) +kobalt (Co) 83/17	5,6 až 90	-	Odolnost proti abrazivnímu opotřebení, dobré kluzné vlastnosti při nízkých teplotách
Karbid wolframu (WC) + nikel (Ni) 92/8	5,6 až 125	-	Použití ve směsi se slitinami niklu, odolnost proti abrazivnímu, erozivnímu a kavitačnímu opotřebení, dobré kluzné vlastnosti

3. Technologie nanášení termických nástřiků

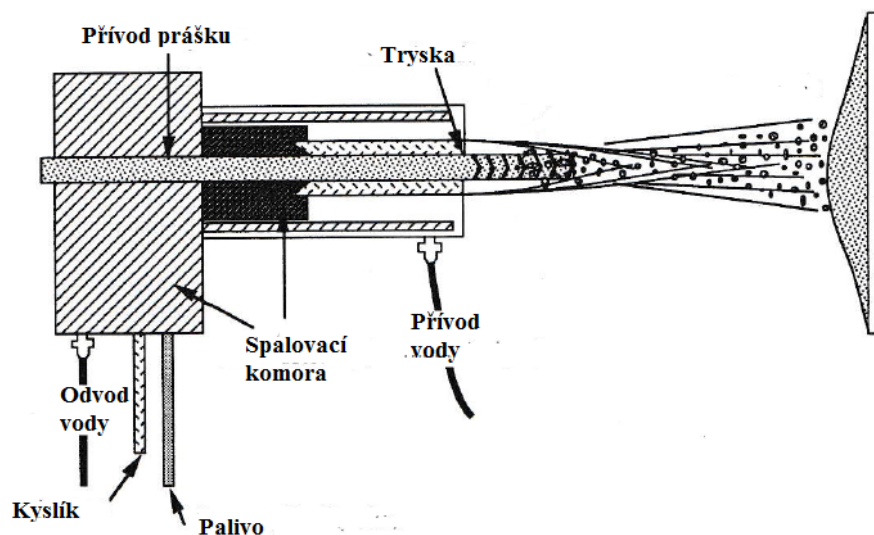
Existuje mnoho metod nanášení povlaků. Pro termické nástřiky, které chrání součásti proti opotřebení, se používají zejména OFW- nástřik plamenem s drátem (oxyfuel wire spray), OFP- nástřik plamenem s práškem (oxyfuel powder spray), EAW- nástřik elektrickým obloukem- electric arc wire spray, PA- nástřik plazmou- plasma arc spray, HVOF- vysokorychlostní nástřik- high velocity oxyfuel powder spray.

Dříve byl například chrom nanášen elektrickým obloukem. Nyní, díky stále se měnícím normám a požadavkům na ochranu životního prostředí, se chrom nanáší častěji metodou HVOF. Většina povlaků, odolných proti opotřebení, se nanáší metodou HVOF či plazmou právě díky dobrým výsledkům těchto technologií. Metoda HVOF je ve velkém rozvoji a pro karbidy se nyní používá mnohem častěji než plazmový nástřik. U strojních součástí, užívaných v letadlovém průmyslu, se ze setrvačnosti používají stále plazmové nástřiky. Vlastnosti povlaků nanášených metodou HVOF jsou však mnohem lepší než povlaků nanášených plazmou. Dále se používá metoda nástřiku elektrickým obloukem. Ta je ve světě stále značně rozšířena díky nízkým nákladům. Povlaky nanášené elektrickým obloukem ale nemají příliš velkou kvalitu ve srovnání například s metodou HVOF. [7, 8]

Tloušťka vrstvy se pohybuje od 75 do 380 μm . Obvykle po nanášení následuje opracování na požadovanou drsnost. Drsnost R_a po nástřiku se pohybuje mezi 0,1 až 1,6 μm . Pokud je potřeba tlustější vrstva povlaku, je dobré použít jako základ buď kovový nebo niklový povlak (NiCrMo, NiCrAl). Poté je možné nanést další vrstvu požadovaného povlaku. [3] Povrch povlakované součásti by neměl být ohříván nad teplotu 150°C. [1]

Na vlastnosti povlaku má vliv i množství přídavného prvku. Pro povlak NiCrBSi slouží jako přídavný prvek např. Fe_2O_3 . Jeho množství se však liší v různých metodách nástřiků. Pro plazmový nástřik je potřeba 26% Fe_2O_3 a pro HVOF 22,5%. Tento poměr zaručuje vhodnou odolnost proti opotřebení. Závislost množství přidávaného Fe_2O_3 je ukázán v tabulce v příloze 1 a 2. [11] Vlastnosti podkladového materiálu, na který je povlak nanášen, jsou také ovlivněny výběrem procesu žárového nástřiku. [1]

3.1 HVOF- Vysokorychlostní nástřik plamenem (high velocity oxyfuel spray)



Obr. 3.1 Vysokorychlostní nástřik plamenem [3]

Metoda HVOF je metoda vysokorychlostního nanášení plamenem. Směs hořlavých plynů je přivedena do spalovací komory. Tady dojde ke vznícení plynů. Odtud plyny přecházejí do usměrňovacího systému a expanzní trysky dlouhé 8-30 cm. Z té poté vycházejí i s nástřikovým materiálem. Materiál je přidáván právě před východem z trysky a je dodáván do středu plamene.

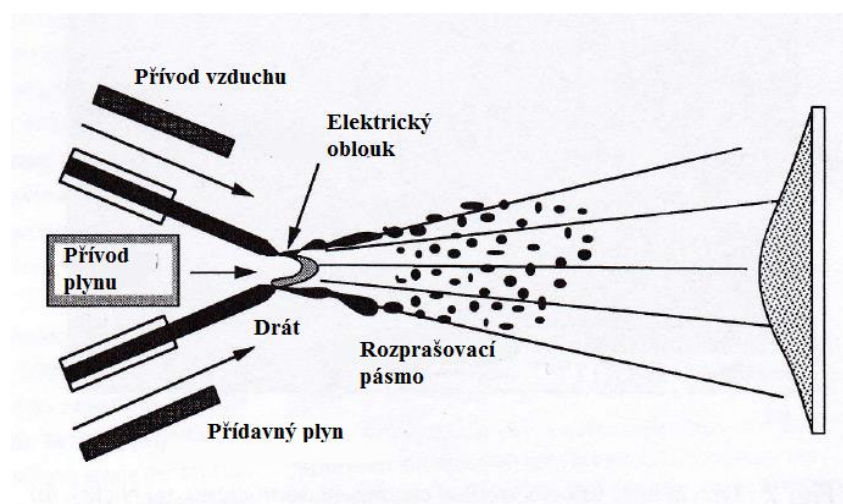
Vycházející plyn má rychlost 1525 až 1825 m.s⁻¹. Teplota směsi se pohybuje do 2800°C. Palivem může být vodík, propylen, propan, acetylen, kerosin, MAPP (methylacetylen-propadien). [3] Částice materiálu nejsou u tohoto typu nástřiku příliš ohřívány. U nástřiku je využívána značná rychlost nástřikového plamene. Vysoké rychlosti nástřiku způsobují, že se částice při dopadu na povrch snáze zdeformují. Nástřiky mají poté dobrou přilnavost k povrchu a vysokou adhezní sílu vůči povrchu. [7] Přilnavost povlaku je u tohoto typu nanášení vyšší než 70MPa a pórovitost povlaků je menší než 1%. [4]

Jsou dva druhy vysokorychlostních nástřiků. První vysokorychlostní typ dosahuje ve spalovací komoře tlaku až 241 kPa a velikost dodaného tepla je až 527 MJ. Druhý typ hyperrychlého nástřiku dosahuje v komoře tlaku od 620 do 827 kPa s dodaným teplem

o 1 GJ. [3] Tento typ nanášení obvykle užívá jako palivo kerosin. Pro podporu spalování je u obou užito buď vzduchu nebo kyslíku. Nanášecí pistole může být chlazená vzduchem nebo vodou. [7] Vysokorychlostní nástřik se díky nízkým nanášecím teplotám užívá zejména pro směsi WC/Co případně samotavitelné směsi se základem NiCrSiB. [4]

3.2 Nástřik elektrickým obloukem

-EAW (electric arc wire spray)

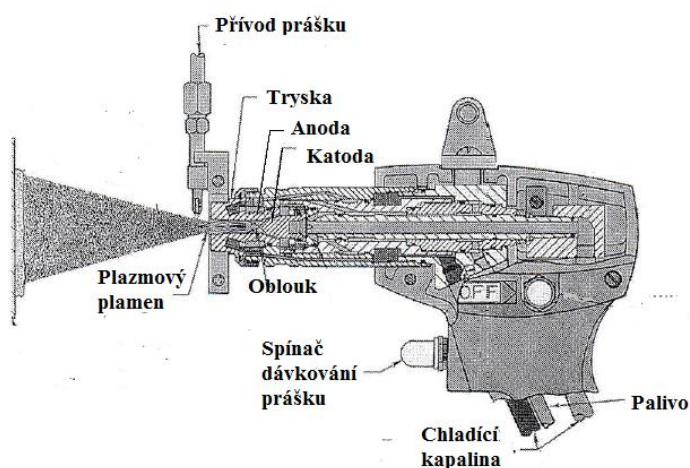


Obr. 3.2 Nástřik elektrickým obloukem [3]

Nanášení povlaků elektrickým obloukem se liší od jiných metod přímým tavením materiálů. Do interakce přicházejí dva dráty fungující jako elektrody. Ty mezi sebou vytvářejí elektrický oblouk. Mohou zde být přítomná i paliva podporující děj hoření nebo paliva pro řízení oxidace nástřiku. [3] Pro rozprašení nataveného materiálu je použitý stlačený vzduch o tlaku 400-600 kPa. [5] Na rozdíl od ostatních metod, se částice dostávají do proudu nástřikového plynu už rozpuštěné. Když opouštějí zónu elektrického oblouku, začínají se ihned ochlazovat. Proto je lepší kratší dopadová vzdálenost. Nástřiky poté lépe přilnou k podkladu. Stejně tak je ke zvýšení přilnavosti využita rychlost rozprašovacího média. Oba tyto faktory také ovlivňují míru oxidace rozprašovaného povlaku. Rychlost částic je až $100 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Nanášení elektrickým obloukem je výhodné z hlediska minimálního ohřevu povlakované součásti. Jediné dopadající teplo si s sebou nesou právě nanášené částice. Rozprašované částice jsou podobných rozměrů jako u plamenového či plasmového nanášení, tedy okolo $200 \mu\text{m}$. Částice mají kulovitý tvar.

Vlastnosti částic jsou ovlivněny různými parametry. Velikost částic například roste, pokud roste velikost proudu a nebo průměr drátů. Velikost částic roste také pokud klesá napětí nebo proud vzduchu. [3] Tloušťka povlaku se pohybuje od 0,2 do 10 mm. [17] Omezení vyplývají z předpokladu, že přídavné dráty jsou z vodivých materiálů. Tato podmínka je však u některých typů materiálů vyřešena obalovanými dráty. Kov je použit jako pouzdro pro prášek či jiný drát. Tak tomu je například u slitin. [5]

3.3 Nástřík plazmou- PA (plasma arc spray)

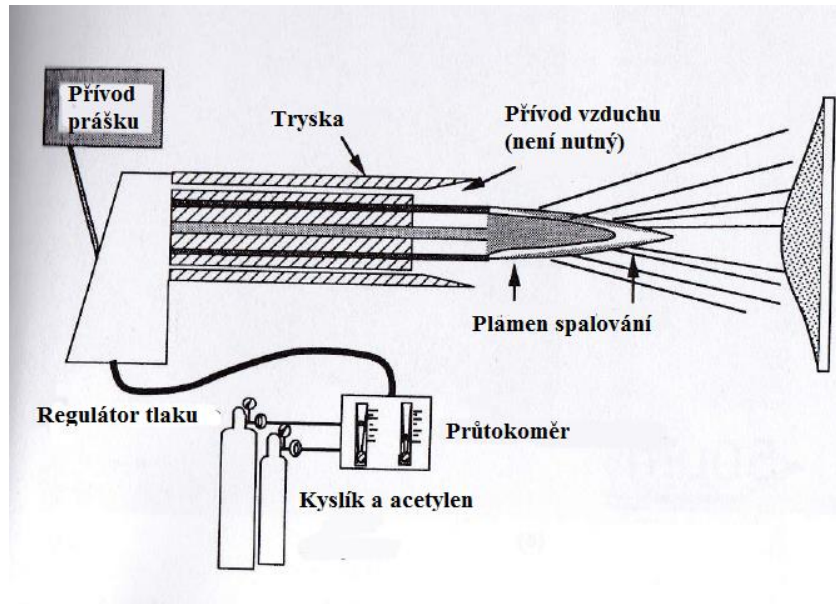


Obr. 3.3 Nástřík plazmou [3]

Nástřík se provádí díky plazmovému oblouku. Ten vzniká mezi katodou a anodou. Jako katoda většinou slouží wolfram a jako anoda měď. Energie z oblouku je převáděna do plynného média tak dlouho, dokud plyn nezačne ionizovat. Elektrony nejsou poté vázány na ionty a pohybují se volně. Když přestane být dodávána energie, elektrony a ionty se znovu spojí. Tím vytváří teplo a světelné záření. Vzniká plazmový paprsek o teplotě až 20 000 °C a rychlosti 2000 m.s⁻¹. Paprsek vynáší roztavené částice materiálu rychlostí až 900 m.s⁻¹. [3] Druhy používaných plynných médií jsou argon(Ar), argon/helium(Ar/He), argon/vodík (Ar/H₂), dusík(N₂), dusík/vodík(N₂H₂). Teplota u ústí hořáku závisí na druhu stabilizačního média. Například pro paprsky stabilizované plynou směsí Ar + H₂ v poměru Ar : H₂ =3,52 je nejvyšší teplota u ústí právě 20 000 °C. U dusíku N₂ je maximální teplota okolo 16 000 °C. Rychlost vycházejících částic závisí i na jejich velikosti při dávkování. Povlakovací materiál je dodáván ve formě prášku.

Je také důležité vybrat nejvhodnější místo v příčném řezu hořáku, které má nejvhodnější teplotu k natavení částic. Prášek je většinou dodáván z boku před ústí plazmového hořáku. Nejvhodnější je však střed ve směru proudu plynu. [5] Částice prášku stráví v paprsku jen krátkou chvíli, proto je tato metoda vhodná pro široké spektrum materiálů. Od nylonu, který má nízkou teplotu tání po beryllium, které má teplotu tání vysokou. [7] Jediné omezující hledisko je ve volbě stabilizačního prostředí. Některá stabilizační média mohou způsobovat oxidaci povlaku, tato metoda je poté vhodná spíše pro oxidy. [5] Pokud se kontrolují všechny parametry nástřiku, může se snížit vnitřní napětí v materiálu. Tím se dá docílit vysoce kvalitního povlaku. Nejnovější technologie také zabraňují přílišnému ohřátí produktu, na který je povlak nanášen. Zabraňuje tomu nový typ hliníkové nebo pozlacené fólie, na které je nanášena flexibilní keramika. Teplota výrobku je redukována až o 65%. Fólie je velmi ohebná a tudíž lehce aplikovatelná. [7]

3.4 Nástřik plamenem s práškem nebo drátem- OFP, OFW (Oxyfuel powder spray, Oxyfuel wire spray)



Obr. 3.4 Nástřik plamenem [3]

Termický nástřik plamenem je základní typ nástřiku. Teplo vzniká při spalování základní směsi plynů. Ve spalovací komoře je smícháván kyslík s acetylenem. Hořením vznikají vysoké teploty. Povlakovací směsi jsou poté přidávány před odchodem plamene

z trysky. Směs může být přidávána formou prášku nebo drátu. Roztavené částice poté vylétávají z trysky a uchycují se na povrch součásti.

Teplota tání materiálu je u drátu mnohem vyšší než u prášku. Je to způsobeno tím, že hustota směsi u drátu je mnohem vyšší. Rychlost plynu je do $100 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Rychlost částic před dopadem je okolo $80 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Spalování plynů se děje nejčastěji mimo naprašovací trysku. Teploty se při spalování pohybují nad $2600 \text{ }^\circ\text{C}$. Teplota jdoucí z trysky je ovlivněna teplotou spalování i způsobem smíchávání spalovaných plynů. Kontrola poměru dodávaného kyslíku umožňuje také kontrolovat, zda bude plamen spíše oxidační či redukční. Pro většinu povlakovacích materiálů je výhodnější spíše redukční plamen. Oxidace je nápomocná spíše při chlazení trysek. [3]

3.5 Porovnání metod žárových nástřiků

Na trhu je k dostání mnoho variant každé nástřikové metody. Liší se kvalitou přídavných materiálů, typem nástřikové pistole a typem ochranných zařízení, které brání vniku nečistot nebo vzduchu do prostředí, kde probíhá nástřik. Při výběru metody nástřiku záleží na možnostech každé firmy. Nanášení povlaků metodou HVOF a plazmou je mnohem nákladnější než nanášení elektrickým obloukem či plamenem. Kvalita povlaků nanášených metodou HVOF je však nesrovnatelně lepší než nanášení elektrickým obloukem. Povlaky nanesené HVOF mají nízkou pórovitost, vysokou přilnavost (mnohdy větší než 70 MPa) a nízký obsah oxidů. [1]

Způsob nanášení je jedním z hlavních faktorů ovlivňující vlastnosti nanesené vrstvy. Stává se běžně, že objekt je porušen dříve než nanesený povlak. To můžeme vidět na obrázku v příloze 3. Trhliny v materiálu se šíří od povrchu do středu. V důsledku toho je poté porušen i povlak. [1] Stejná vrstva téhož naneseného materiálu, aplikovaná různými způsoby, má za následek různou únavovou životnost podkladu. Např. obloukové nanášení NiAl5 má za následek o třetinu delší únavovou životnost podkladu než plazmové nanášení. Oproti tomu nanášení NiAl5 metodou HVOF má za následek až 4 krát delší únavovou životnost podkladu než nanášení obloukové. Vrstva Al_2O_3 nanášená vodou stabilizovaným hořákem má až dvounásobnou délku únavové životnosti než u nanášení plynem stabilizovaným hořákem. [2] Zkrácení doby únavové životnosti je u kovových materiálů mnohem výraznější. HVOF u kovových nástřiků životnost zvyšuje, naopak kovové nástřiky nanesené elektrickým obloukem vedou ke snížení životnosti podkladu. [1]

Tab. 13 Porovnání metod žárových nástřiků [3]

	Plamen	HVOF	El. oblouk	Plazma
Rychlost u trysek [m.s ⁻¹]	50-100	500-1200	50-100	300-1000
Teplota plynu za tryskou [°C]	3200	5200	>25000	15000
Provozní výkon [kW]	20	150-300	2-5	40-200
Rychlost částic za tryskou [m.s ⁻¹]	50-100	200-1000	50-100	200-800
Teplota částic [°C]	2500	3300	>3800	>3800
Dávkování materiálu [g.min ⁻¹]	30-50	15-50	150-2000	50-150
Hustota povlaku [%]	85-90	>90	80-95	90-99
přilnavost [MPa]	7-18	68	10-40	<68
Oxidace povlaku	vysoká	Mírná až střední	Mírná až vysoká	Mírná až středně vysoká

Za vznikem trhlin a vad v materiálu může být i špatná přilnavost nanášené vrstvy v důsledku různých technologií nanášení povlaků. Při použití nástřiků s vyšší únavovou životností, tj. R_f (relativní životnost) >1 , byly nerovnosti povrchu podkladu vyplněny velmi dobře. U nástřiků s nižší únavovou životností povlak nekopíroval nerovnosti podkladu tak dobře. To mělo za následek vznik trhlin. Vyplnění podkladu povlakem je zobrazeno na obrázku v příloze 4. [1]

Závěr

Práce byla zaměřena na problematiku termických nástřiků odolných proti opotřebení. Na začátku práce je uveden přehled procesů opotřebení. Práce popisuje vznik jednotlivých opotřebení.

Následující kapitola popisuje nanášení povlaků po strukturní stránce a uvádí nastavitelné parametry nutné pro nanášení optimálního povlaku. Dále jsou uvedeny typy materiálů, které jsou odolné proti jmenovaným procesům opotřebení. U materiálů jsou ve zkratkách vypsány metody, kterými jsou termické nástřiky aplikovatelné. U jednotlivých materiálů jsou uvedeny údaje o dávkování pro nanášení povlaku a údaje o tvrdosti materiálu a jeho teplotě tavení. U materiálů jsou připsány i vedlejší mechanické vlastnosti.

V následující kapitole jsou vypsány metody aplikace povlaků a je popsán princip aplikace jednotlivých nástřiků. U metod je uvedena rychlost i teplota nanášení povlaků. Na závěr jsou jednotlivé technologie nanášení zhodnoceny podle různých kritérií, které jsou směrodatné pro výběr vhodnější metody nanášení termických nástřiků.

V budoucím studiu bych se chtěla této tématice věnovat podrobněji. Ráda bych se zaměřila na materiály odolné proti opotřebení, které jsou nanášeny metodou HVOF. Proto bych téma další práce chtěla směřovat na ovlivnění kvality povlaků změnou parametrů nástřiku.

Citovaná literatura

1. Siegel, J. Výzkum únavového chování těles se žárovými nástřiky: Fatigue behaviour of bodies with thermally sprayed coatings. Praha: České vysoké učení technické, 2007. s. 10-18. ISBN 978-80-01-03731-7.
2. Siegel, J.; Adámek, J.; et al. Evaluation of fatigue Properties of Various Thermal Spray Coatings. Materials Park. Ohio: ASM International, 2006. s. 6.
3. Handbook of thermal spray technology. Materials Park, OH: ASM International, 2004. s. 47-73, 171-172, 180-182, 225-226, 263. ISBN 0871707950.
4. Návary a žárové nástřiky: sborník přednášek. Ostrava: Dům techniky ČSVTS, 1990, s. 109, ISBN 80-02-00407-8.
5. Ambrož, O.; Kašpar, J. Žárové nástřiky a jejich průmyslové využití. Praha: SNTL-Nakladatelství technické literatury, 1990. s. 100-140. ISBN 80- 03- 00347- 4
6. Suchánek, J. Adhezivní opotřebení. Tribotechnika: TechPark, 2010. 2008-2015. [17.3.2015]. Dostupné na WWW: <http://www.tribotechnika.sk/tribotechnika-22010/adhezivni-opotrebeni.html>
7. Thorpe, R.; et al. HVOF Thermal spray technology. Advanced Materials and processes, Portland, Ore: ASM international, Apr. 2000, Vol. 157 Issue 4. [3.4.2015]. s.27. Dostupné na WWW: <https://www.techlib.cz/cs/>
8. Technologie žárového nástřiku v leteckém průmyslu. MM průmyslové spektrum: SEO 2001/5. 2015. [27.3.2015]. s. 19. Dostupné na WWW: <http://www.mmspektrum.com>.
9. Venkataraman, M.; et al. Wear resistant thermal spray coatings for Wind-Turbine components. Advanced Materials and processes. Portland, Ore: ASM International, November 1. 2011 Vol. 169 Issue 11. [19.3.2015]. s. 9-12. Dostupné na WWW: <https://www.techlib.cz/cs/>
10. Wear resistant coatings, tungsten carbide and ceramic coatings. Thermal spray Technologies. TST. Engineered Coating Solution: A Fisher Barton Company, 2015. Dostupné na WWW: http://www.tstcoatings.com/wear_resistant_coatings.html,

11. Zórawski, W.; et al. Properties of plasma and HVOF sprayed coatings. University of Zilina, Faculty of Mechanical Engineering: Materiálové Inžinierstvo, 20.1 (2013). s. 2-11.
12. L. Pawlowski, L. The science and engineering of thermal spray coatings. 2nd ed. Chichester: John Wiley & Sons, 2008.
13. Fournier, D.; et al.: Journal Vacuum Science and Technology A3 (6). New York, Nov/Dec, 1985. [3.4.2015] s. 2475. Dostupné na WWW:
<https://www.techlib.cz/cs/>
14. Ronald, W.; Apelian, D. (1987). Melting Phenomena of Several Nickel Base Alloys in a Plasma Jet Operating at Low Pressure. MRS Proceedings, 98, 89 doi: 10.1557/PROC-98-89.
15. Kabelka, M.; Tajchman, P. Keramické a sendvičové termicky stříkané povlaky ve Vítkovicích-ENVI, a.s. Hradec nad Moravicí: METAL, 23.-25.5.2006. [5.4.2015]. s. 4. Dostupné na WWW:
<http://konference.tanger.cz/data/metal2006/sbornik/papers/217.pdf>
16. Suchánek, J.; et al. Odolnost proti abrazivnímu opotřebení slitin neželezných kovů. Tribotechnika. TechPark, 2012/ 1. [24.3.2015]. s. 16. Dostupné na WWW:
<http://www.tribotechnika.sk/tribotechnika-12012/odolnost-proti-abrazivnimu-opotrebeni-slitin-nezelezných-kovu.html>
17. Nástřík elektrickým obloukem. SERVIS ARMATUR spol. s. r. o., 2012. Dostupné na WWW: <http://www.servisarmatur.cz/index.php>

Seznam obrázků

Obr. 3.1 Vysokorychlostní nástřik plamenem [3]	14
Obr. 3.2 Nástřik elektrickým obloukem [3]	15
Obr. 3.3 Nástřik plazmou [3]	16
Obr. 3.4 Nástřik plamenem [3]	17

Seznam tabulek

Tab. 1 Měkké povlakovací materiály a způsob nanášení [3].....	6
Tab. 2 Tvrdé povlakovací materiály a způsob nanášení [3].....	7
Tab. 3 Materiály povlaků odolných proti abrazivnímu opotřebení a způsob nanášení [3].....	7
Tab. 4 Materiály povlaků odolných proti vibračnímu opotřebení a způsob nanášení [3].....	7
Tab. 5 Materiály povlaků odolných proti vibračnímu opotřebení za malých teplot (<540°C) a způsob nanášení [3].....	8
Tab. 6 Materiály povlaků odolných proti vibračnímu opotřebení za velkých teplot (>540°C) a způsob nanášení [3].....	8
Tab. 7 Materiály povlaků odolných proti erozivnímu opotřebení a způsob nanášení [3].....	8
Tab. 8 Materiály povlaků odolných proti kavitačnímu opotřebení a způsob nanášení [3].....	8
Tab. 9 Vlastnosti vybraných povlakovacích materiálů odolných proti opotřebení [5]....	9
Tab. 10 Keramické materiály odolné proti opotřebení a jejich vlastnosti [5]	9
Tab. 11 Materiály na bázi neoxidické keramiky odolné proti opotřebení a jejich vlastnosti [5]	11
Tab. 12 Materiály na bázi neoxidické keramiky odolné proti opotřebení a jejich vlastnosti [5]	12
Tab. 13 Porovnání metod žárových nástřiků [3].....	20

Seznam příloh

Příloha 1: Závislost odolnosti proti opotřebení a adhezivnímu opotřebení na množství Fe_2O_3 při nanášení plasmou (graf) [11]

Příloha 2: Závislost odolnosti proti opotřebení a adhezivnímu opotřebení na množství Fe_2O_3 při nanášení HVOF (graf) [11]

Příloha 3: Metalografický výbrus vzorku s molybdenovým povlakem (obrázek) [1]

Příloha 4: Vliv technologie nanášení na mikromorfologii povrchu nástřiků (obrázek) [1]

Příloha 5: Porozita vzniklá stínovým efektem při mimoosém stříkání (obrázek) [3]

Příloha 6: Mikrostruktura povlaku (obrázek) [3]

Příloha 7: Tvar splatů (obrázek) [3]

Příloha 8: Nástřik povlaku NiCrBSiC plamenem (obrázek) [3]

Příloha 9: Nástřik plasmou, oxidace povrchu NiAl (obrázek) [3]

Příloha 10: Povlak WC/Co nanesený plasmou (obrázek) [3]

Příloha 11: Povlak WC/Co nanesený vysoko-energičnou plasmou (obrázek) [3]

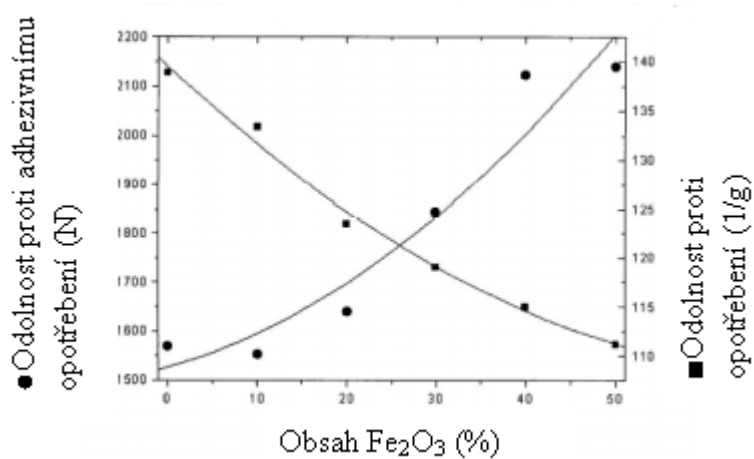
Příloha 12: Povlak WC/Co nanesený HVOF (obrázek) [3]

Příloha 13: Povlak NiCrAl (obrázek) [3]

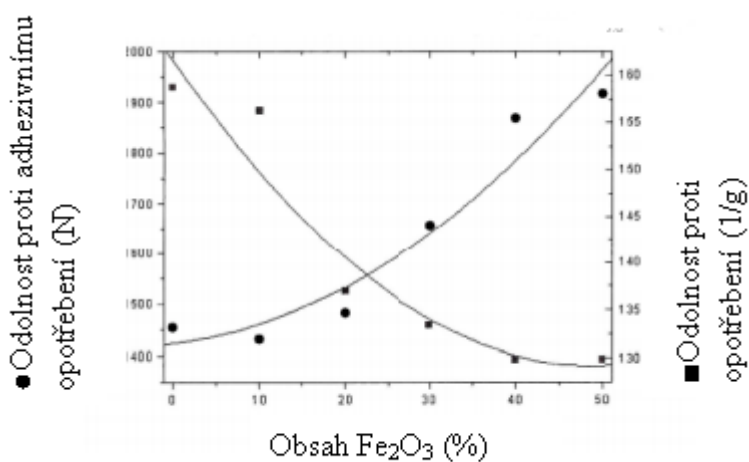
Příloha 14: Povlak NiAl (obrázek) [3]

Příloha 15: Stavba některých typů povlakovacích pistolí (obrázek) [3]

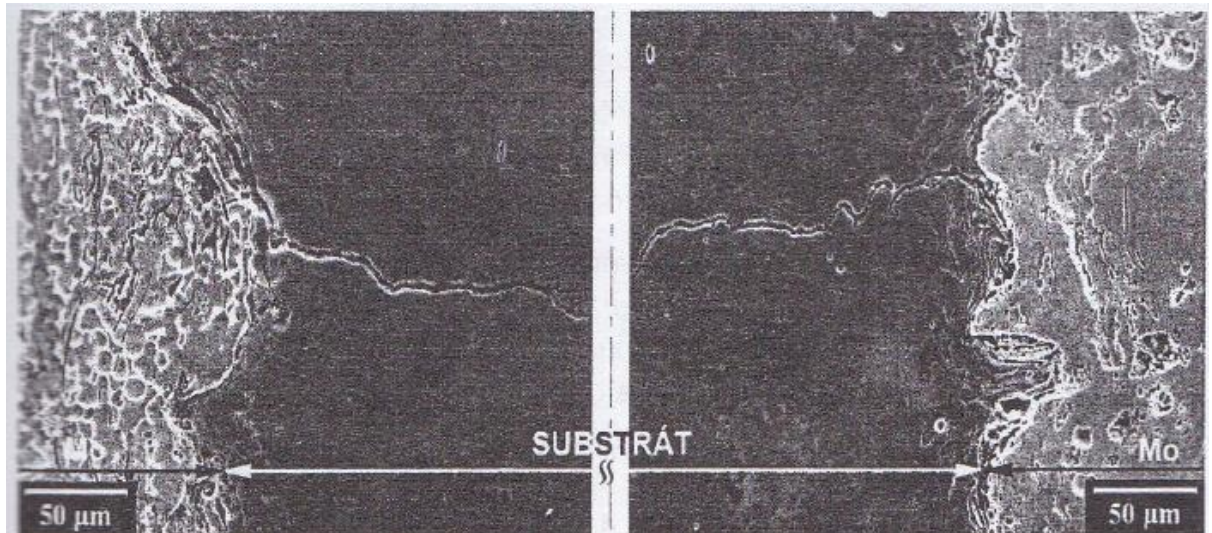
Přílohy



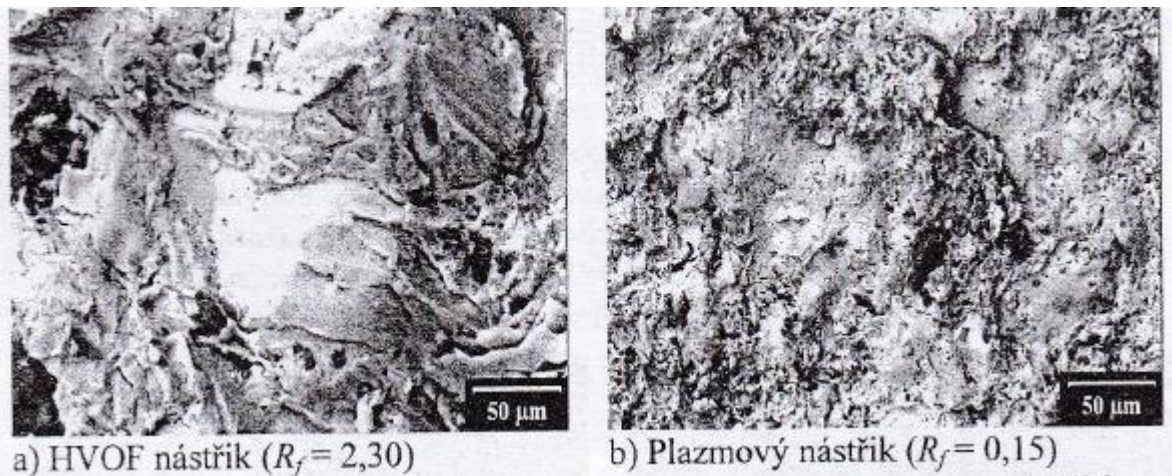
Příloha 1: Graf závislosti odolnosti proti opotřebení a adhezivnímu opotřebení na množství Fe₂O₃ při nanášení plasmou [11]



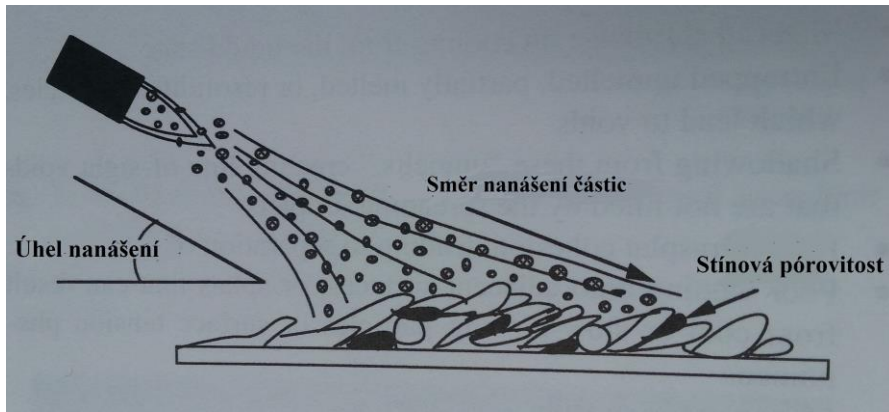
Příloha 2: Graf závislosti odolnosti proti opotřebení a adhezivnímu opotřebení na množství Fe₂O₃ při nanášení HVOF [11]



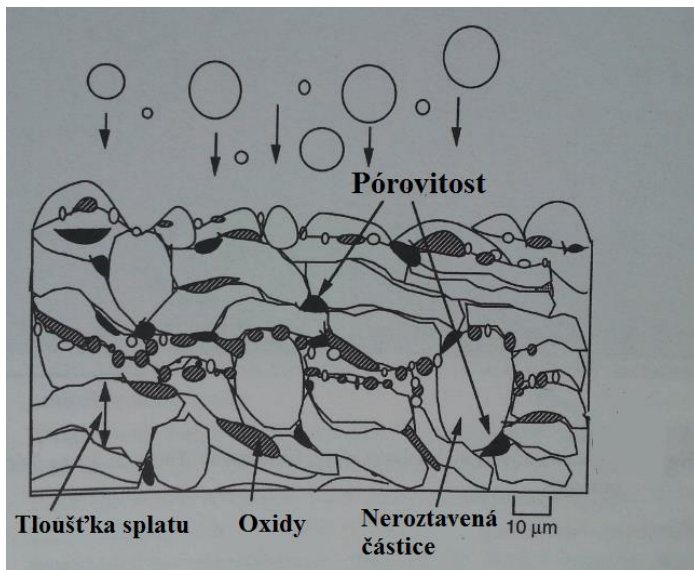
Příloha 3: Metalografický výbrus v rovině kolmé k povrchu vrstev a rovnoběžné s podélnou osou tělesa. Na snímcích lze pozorovat únavové trhliny, které iniciovaly na povrchu substrátu (pod vrstvou molybdenu) a šířily se napříč přes tloušťku substrátu [1]



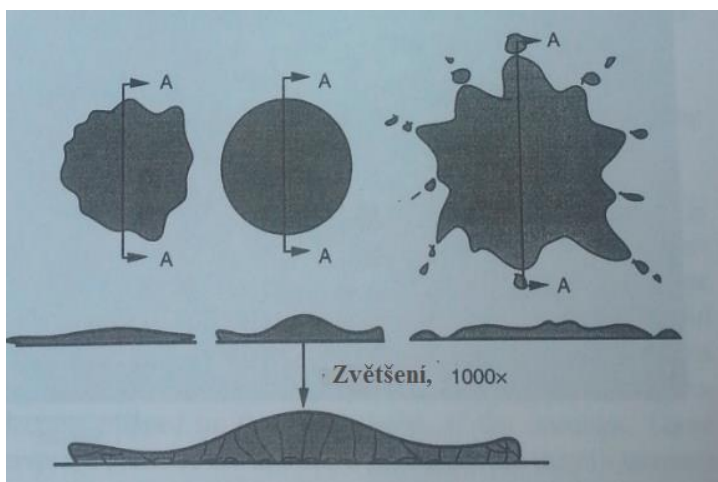
Příloha 4: Vliv technologie nanášení na mikromorfologii povrchu nástřiků ze strany podkladu (v závorkách jsou uvedeny délky relativních životů) [1].



Příloha 5: Porozita vzniklá stínovým efektem při mimoosém stříkání [3]



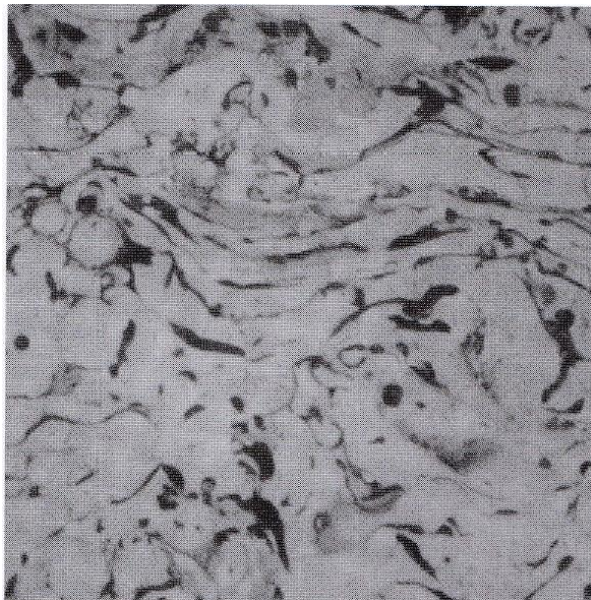
Příloha 6: Mikrostruktura povlaku[3]



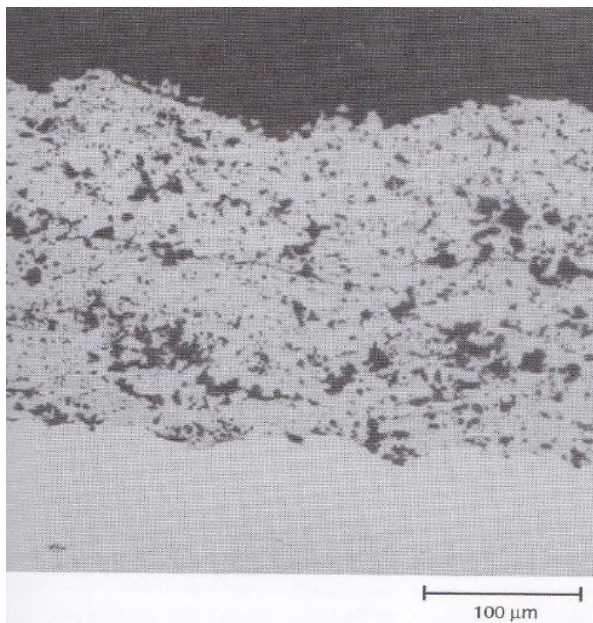
Příloha 7: Tvar splatů [3]



Příloha 8: Nástřik povlaku NiCrBSiC plamenem [3]



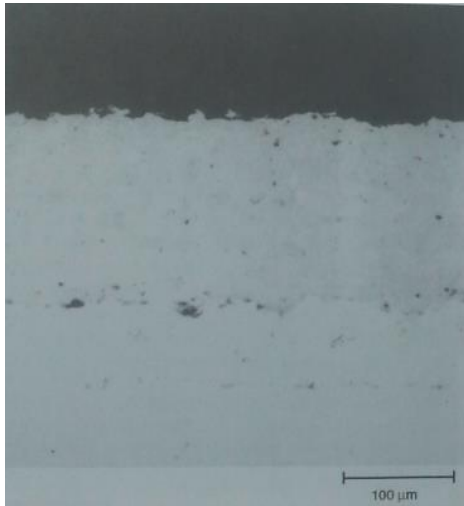
Příloha 9: Nástřik plazmou, oxidace povrchu NiAl [3]



Příloha 10: Povlak WC/Co nanesený plazmou [3]



Příloha 11: Povlak WC/Co nanesený vysoko-energickou plazmou [3]



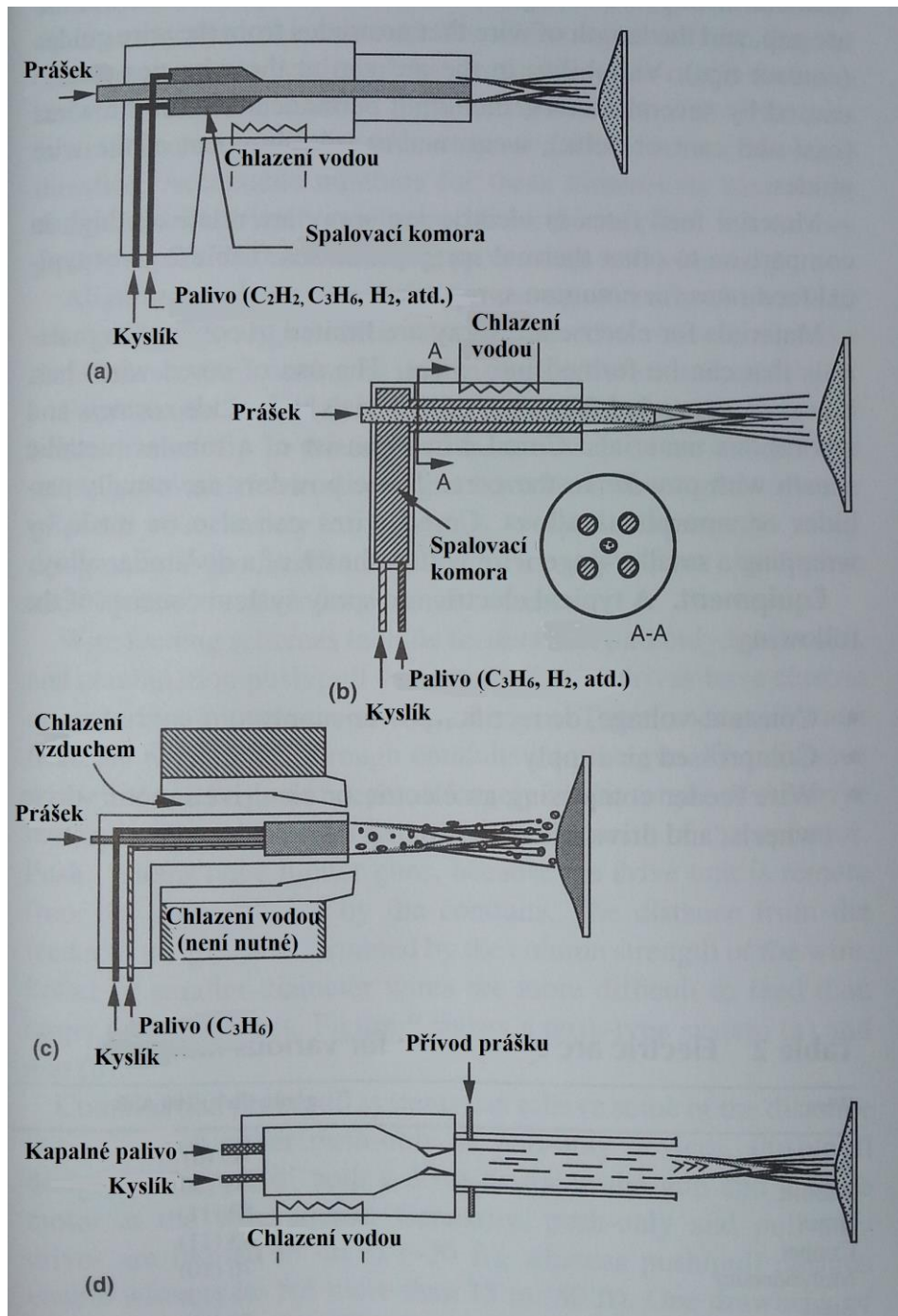
Příloha 12: Povlak WC/Co nanesený HVOF [3]



Příloha 13: Povlak NiCrAl [3]



Příloha 14: Povlak NiAl [3]



Příloha 15: Stavba některých typů povlakovacích pistolí. A)HV-2000. B) JetKote. C)Diamond Jet (D-J). D) JP-5000 [3]