

Optimalizace žárového nástřiku elektrickým obloukem

Petr Nepovím^{1,*}

¹ ČVUT v Praze, Fakulta strojní, Ústav materiálového inženýrství, Karlovo náměstí 13, 121 35 Praha 2, Česká republika

Abstrakt

Práce se zabývá optimalizací žárového nástřiku elektrickým obloukem při generální opravě komponentů průmyslových plynových turbín. Optimalizace spočívá v nahrazení používaného drátu typu NiCrAl za drát FeCrAl, při zachování požadovaných vlastností za současného poklesu ceny procesu. Pro analýzu testovaných materiálů jsou využity techniky elektronové a optické mikroskopie a mechanické zkoušky. Výsledky práce jsou konzultovány s výzkumným ústavem společnosti Solar Turbines v San Diegu a Ústavem fyziky plazmatu AV ČR. Vzhledem ke splnění stanovených požadavků na experimentální materiál bude přistoupeno k jeho aplikaci na specifické komponenty průmyslových plynových turbín.

Klíčová slova: Žárový nástřik; plynové turbíny, žárový nástřik elektrickým obloukem, FeCrAl, NiCrAl

1. Úvod

Tato práce pojednává o optimalizaci žárového nástřiku elektrickým obloukem při generální opravě komponentů průmyslových plynových turbín ve společnosti Solar Turbines EAME s.r.o..

Plynová turbína je mechanický stroj s vnitřním systémem spalování, který přeměňuje chemickou energii obsaženou v palivu na mechanickou práci v podobě rotačního pohybu. Mezi pět základních částí plynové turbíny patří vstupní ústrojí, kompresorová část, spalovací komora, turbínová část a výstupní ústrojí. Plynové turbíny menších výkonů nacházejí využití převážně jako lodní a letecké motory, jelikož svými výkony převyšují pístové motory. Turbíny s velkými výkony se používají zejména v energetickém průmyslu pro pohon generátorů při výrobě elektrické energie, ale slouží také k pohánění kompresorů a čerpacích systémů při těžbě zemního plynu a ropy.

Životnost komponentů plynové turbíny je značně ovlivněna teplotou působící na jejich povrch, typem používaného paliva a počtem provozních cyklů turbíny. Snaha výrobců neustále zvyšovat teplotu spalování klade vysoké nároky na používané materiály. Pro dosažení požadovaných vlastností je v mnoha případech nutné používat ochranné povlaky, jelikož bez nich není možné u materiálů dosáhnout požadované pevnosti a zároveň odolnosti proti korozi v extrémních podmínkách. Vytvořit ochranný povlak na povrchu součásti lze mnoha způsoby, ale v této práci je zaměřena pozornost na technologii žárového nástřiku elektrickým obloukem. [1]

Žárový nástřik je obecný název pro skupinu procesů, při kterých se kovové a keramické materiály, cermety a některé druhy polymerů v práškové formě, ve formě drátu nebo suspenzí přivádí do zdroje tepla, kde dojde k jejich ohřátí na teplotu blízkou teplotě tání daného materiálu. Takto částečně či zcela natavené částice jsou následně urychlovány proudem přiváděného plynu a vystřelovány na připravený podkladový materiál. Při dopadu na jeho povrch se částice deformují a dochází k jejich plošnému rozprostření a rychlému ztuhnutí. Tím dojde

ke vzniku povlaku s charakteristickou lamelární strukturou a specifickými vlastnostmi. [2], [3]

Princip žárového nástřiku elektrickým obloukem spočívá v hoření elektrického oblouku mezi dvěma vodivými přídavnými materiály (ve formě drátu), čímž dochází k jejich natavení. Vzniklá tavenina je rozprašována pomocí stlačeného plynu pod tlakem 0,4 až 0,6 MPa. Stlačený plyn uděluje nanášeným částicím vysokou rychlost, což značně ovlivňuje výslednou kvalitu povlaků. Takto urychlené částice jsou proudem plynu unášeny na připravenou podložku a vytvářejí požadovaný povlak. [4]

2. Experimentální část

2.1. Aplikáční zařízení

Zařízení používaná pro nástřik elektrickým obloukem mají v závislosti na aplikaci povlaku různou konstrukci. Liší se především tvarem, průměrem přiváděného drátu nebo velikostí výstupní trysky. Různé konstrukce těchto zařízení umožňují dosažení rozdílných průtoků vstupujícího plynu (nejčastěji vzduchu) a také mají vliv na množství vnesené energie. Pro každý typ materiálu existují specifické hodnoty napětí a proudu, při kterých dojde k optimálnímu natavení. Stupeň natavení přídavného materiálu je velmi důležitý, jelikož zabezpečuje vznik stabilní a kompaktní vrstvy, čímž přímo ovlivňuje kohezní pevnost vzniklého povlaku. Zařízení pro žárový nástřik elektrickým obloukem použité pro provedení experimentu v této práci bylo vyrobeno firmou Hardface Alloys a nese označení ARCote 9140 (obrázek 1). [3]

* Kontakt na autora: Petr.Nepovim@fs.cvut.cz



Obr. 1. Nástřiková pistole ARCote 9140 upevněná na rameni manipulačního robota

2.2. Experimentální materiál

V praktické části této práce byla zaměřena pozornost na optimalizaci procesu žárového nástřiku elektrickým obloukem záměnou používaného drátu typu NiCrAl na typ FeCrAl.

Původní myšlenka nahradit aktuálně používaný materiál, který je vzhledem k vysokému obsahu niklu poměrně drahý, vychází z oblasti použití daného nástřiku. Momentálně se nástřik elektrickým obloukem s použitím přídavného materiálu na bázi niklu používá výhradně pro obnovu rozměrů statických komponentů plynových turbín. Převážná část těchto komponentů je vyrobena z litiny s kuličkovým grafitem, tudíž mechanické vlastnosti výsledného povlaku převyšují vlastnosti základního materiálu. Kromě snížení výrobních nákladů, což byl jeden z hlavních aspektů, musel nový materiál splňovat následující požadavky:

- Kohezní pevnost ≥ 40 MPa
- Tvrdost povlaku 60 – 95 HRB
- Drsnost povrchu Ra základního materiálu před nástřikem minimálně 3,2 μm
- Kompatibilita s materiály na bázi železa
- Tepelná odolnost do teploty min. 550 °C
- Minimální výsledná tloušťka povlaku 1,5 mm
- Dostupnost ve formě drátu daného průměru
- Srovnatelná korozivzdornost jako základní materiál
- Mikrostruktura výsledného povlaku srovnatelná s materiálem na bázi niklu

Výsledná volba materiálu typu FeCrAl vzešla z kombinace studia vědeckých prací, technických zpráv a rozsáhlých diskuzí s odborníky z Ústavu fyziky plazmatu AV ČR a odborníky z vývojového centra společnosti Solar Turbines sídlícího v San Diegu.

2.2.1. Přídavný materiál typu NiCrAl

Dosud používaný přídavný materiál typu NiCrAl nesoucí označení Metco 8443 byl dodán společností Oerlikon Metco ve formě plněného trubičkového drátu o průměru

1,6 mm. Tento materiál se vyznačuje výbornou korozivzdorností i za zvýšených teplot, dobrou obrobiteľnosť a vytvářením povlaků s homogenní strukturou. Mezi jeho hlavní použití patří obnova rozměrů u dílů z uhlíkových a korozivzdorných ocelí, tvorba povlaků odolných proti erozi, vytváření mazných mezivrstev pro keramické nástřiky a tvorba korozivzdorných povlaků pro použití za vyšších teplot (až do teploty 1000 °C). Základní chemické složení tohoto materiálu je uvedeno v tabulce 1.

Tabulka 1. Chemické složení materiálu Metco 8443

Materiál	Hm. %				
	Ni	Cr	Al	Mn	Ostatní
Metco 8443	Zákl. složka	18	6	2	Max 1

2.2.2. Přídavný materiál typu FeCrAl

Jako alternativa pro používaný drát Metco 8443 byl zvolen přídavný materiál typu FeCrAl od společnosti Oerlikon Metco s označením Metco 8236. Na rozdíl od předchozího materiálu byl dodán ve formě plněného drátu o průměru 1,6 mm. Vzniklý povlak se vyznačuje především kombinací vysoké pevnosti, dobré obrobiteľnosti a vynikající korozivzdornosti. Mezi jeho další přednosti patří vysoká tvrdost a odolnost proti působení chemických látek. Použití nachází zejména v zemědělském, textilním a energetickém průmyslu při tvorbě korozivzdorných povlaků, povlaků odolných proti erozi a abrazi, při obnově rozměrů opotřebených dílů a při tvorbě ochranných povlaků v agresivním mořském prostředí. V tabulce 2 je uvedeno jeho základní chemické složení.

Tabulka 2. Chemické složení materiálu Metco 8236

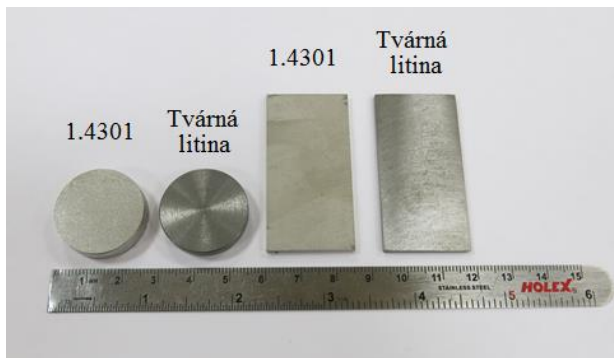
Materiál	Hm. %					
	Fe	Cr	Al	C	Si	Ostatní
Metco 8236	Zákl. složka	25	5	0,25	0,25	Max 1

2.3. Příprava zkušebních vzorků

Dle interní směrnice společnosti Solar Turbines je pro správné provedení testu žárového nástřiku zapotřebí 3 vzorků ve formě kvádrů o rozměru 50 × 25 × 2 mm a 3 válečků o rozměru Ø25 × 5 mm. Přestože je většina stříkaných dílů vyrobena z tvárné litiny, byla jedna sada vzorků především z důvodu snadné výroby zhotovena z chrom-niklové korozivzdorné austenitické oceli nesoucí označení 1.4301. Podstata spojení povlaku s podložkou vychází z mechanického zakotvení částic na povrchu a tudíž by druh základního materiálu neměl ovlivňovat výsledky testování. Z důvodu ověření této teorie však byla druhá sada vzorků vyřezána z poškozené kompresorové skříně. Materiálem této sady vzorků je litina s kuličkovým grafitem s feriticko-perlitickou maticí, používána pro výrobu většiny statických komponentů plynové turbíny. Přesné označení této litiny nemůže být uvedeno z důvodu zachování obchodního tajemství společnosti Solar Turbines. Součástí práce bude tedy kromě srovnání vlastností žárového nástřiku NiCrAl a FeCrAl provedeno zároveň

ověření vlivu základního materiálu na vlastnosti výsledného povlaku.

Jednotlivé vzorky jsou v základním stavu k vidění na obrázku 2.



Obr. 2. Přehled zkušebních vzorků v základním stavu

Před samotným nástřikem bylo nutné zvětšit povrch vzorků. Za tímto účelem bylo provedeno otryskání povrchu základního materiálu umělým hnědým korundem Al_2O_3 o středím průměru zrna $745 \mu m$. Otryskané vzorky byly následně pomocí oboustranné pásky připevněny ke speciálnímu přípravku. Přípravek se vzorky byl usazen na rotační stůl, což umožňovalo rovnoměrné nanesení vrstvy povlaku (viz obrázek 3).



Obr. 3. Přípravek s testovacími vzorky upevněný k rotačnímu stolu

Aby bylo možné nanést povlak o požadované tloušťce, muselo být před žárovým nástřikem provedeno kontrolní měření tloušťky vybraných vzorků. Po naměření požadovaných hodnot byl přípravek přemístěn do stříkacího boxu, kde došlo k provedení žárového nástřiku. Procesní parametry žárového nástřiku byly zvoleny stejně pro materiál NiCrAl i FeCrAl a jsou uvedeny v tabulce 3.

Tabulka 3. Zvolené procesní parametry žárového nástřiku

Procesní parametr	Hodnota
Proud	150 A
Napětí	31 V
Tlak protékajícího vzduchu	0,4 MPa
Stříkací vzdálenost	100 mm
Úhel nástřiku	20°

Stříkací vzdálenost v tomto případě označuje vzdálenost povrchu podložky od ústí nástřikové pistole a úhel nástřiku značí úhel osy proudu částic vůči kolmici ke stříkanému povrchu.

Vždy po určitém počtu cyklů došlo k zastavení procesu a bylo provedeno kontrolní měření tloušťky. Proces žárového nástřiku probíhal dokud nebylo dosaženo požadované tloušťky vrstvy. Po dosažení požadované tloušťky povlaku byl proces žárového nástřiku ukončen a bylo přistoupeno k opatrnému sejmutí vzorků z přípravku. Takto připravené vzorky byly následně podrobeny testování a jsou znázorněny na obrázku 4.



Obr. 4. Zkušební vzorky NiCrAl na podložce z litiny s kuličkovým grafitem po provedení žárového nástřiku

2.4. Metody kontroly

Při vyhodnocování jednotlivých vzorků byla použita vnitřní směrnice společnosti Solar Turbines, která specifikuje konkrétní požadavky pro daný typ povlaku. Kontrola je rozdělena celkem na 6 částí: vizuální kontrola, metalografický rozbor, rozbor chemického složení, měření tloušťky povlaku, tvrdosti a adhezně/kohezní pevnosti.

2.4.1. Vizuální kontrola

V tomto kroku probíhá kontrola výsledného povrchu pouhým okem, při které dochází k vyhodnocení celistvosti povlaku. Na povrchu se nesmí vyskytovat žádné velké defekty (např. trhliny nebo dutiny). Zároveň musí být povrch dílu zbaven veškerého maskovacího materiálu. Povlak by měl být nanesen rovnoměrně po celé ploše vzorku a neměl by vykazovat známky odlupování či praskání. Jelikož se nejedná o normalizovanou zkoušku, vychází se při ní zejména ze zkušeností a znalostí laboratorních techniků.

2.4.2. Metalografický rozbor a měření tloušťky povlaku

Dalším stupněm je kontrola mikrostruktury a měření tloušťky povlaku pomocí světelné mikroskopie. Pro hodnocení mikrostruktury se používá obrazová analýza v místě řezu povlakem, vedeným kolmo k rozhraní mezi povlakem a základním materiálem. Velká pozornost musí být věnována zejména na metalografickou přípravu zkoumaného vzorku, jelikož při volbě nevhodných podmínek může dojít ke zkreslení naměřených hodnot. V tabulce 4 jsou uvedeny požadavky, které musí výsledný povlak splňovat.

Tabulka 4. Požadavky na výsledný povlak z hlediska mikrostruktury

Kritérium	Přípustná hodnota
Kontaminace na rozhraní mezi podložkou a nástřikem	≤ 25%
Pórovitost	≤ 8%
Množství oxidů	≤ 25%
Množství nenatavených částic	≤ 10%

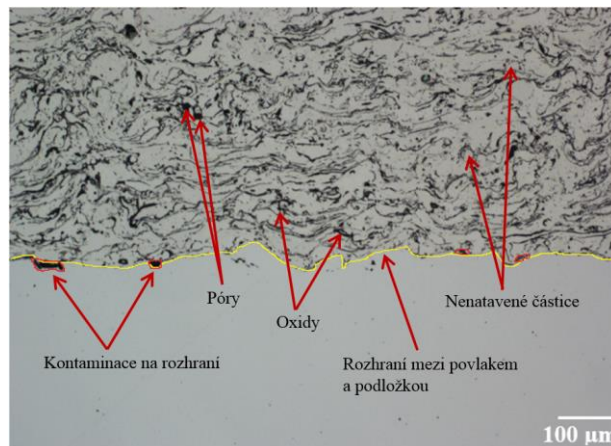
Příprava vzorků pro světelnou mikroskopii spočívá v odebrání vzorku, broušení a leštění. Během přípravy metalografického výbrusu je nutné vyhnout se vzniku vad, které by mohly negativně ovlivnit výsledky měření. Nejčastěji se objevující vadou výbrusů jsou uvolněné a vypadané tvrdé částice, které vytvářejí stopy připomínající póry, čímž zvyšují naměřenou pórovitost.

Z testovaných vzorků byly na kotočové pile nejprve nařezány vzorky ve tvaru kvádrů. Po nařezání následovalo zalití vzorků za studena v přístroji CitoVac, broušení a leštění. Takto připravené vzorky byly podrobeny obrazové analýze na světelném mikroskopu Nikon Eclipse MA200.

Nejprve bylo na 5 místech provedeno měření tloušťky povlaku. Z naměřených hodnot byla pomocí aritmetického průměru získána výsledná tloušťka. Kontaminace na rozhraní mezi podložkou a nástřikem byla posuzována také celkem na 5 místech. Vyhodnocení probíhalo při stonásobném zvětšení naměřením velikosti rozhraní a velikosti jednotlivých nečistot. Výsledná kontaminace byla určena jako procentuální zastoupení velikosti nečistot vůči celkové velikosti rozhraní. Stanovení množství oxidů a pórovitosti povlaku probíhalo na 3 místech při stonásobném zvětšení. Posloužil k tomu software NIS-Elements, který přesně určil procentuální zastoupení oxidů a pórů. Jako poslední bylo na světelném mikroskopu stanoveno množství nenatavených částic. To probíhalo stejně jako předchozí měření při stonásobném zvětšení na 3 místech. Došlo k vytvoření sítě 20 × 20 čtverců, čímž vzniklo celkem 400 uzlů. Poté bylo posuzováno, kolik z těchto uzlů zasahuje do nenatavené částice, případně kolika uzlů se nenatavené částice dotýkají. Výsledné množství nenatavených částic bylo stanoveno pomocí rovnice (1), ve které X vyjadřuje množství nenatavených částic, P₁ počet uzlů zasahujících do nenatavené částice a P₂ počet uzlů dotýkajících se nenatavené částice.

$$X = \frac{P_1 + \frac{P_2}{2}}{400} [\%] \quad (1)$$

Vyhodnocované položky jako je kontaminace na rozhraní (velikost rozhraní a nečistot), oxidy, póry a nenatavené částice znázorňuje obrázek 5.



Obr. 5. Vyhodnocované položky u mikrostruktury vzorku NiCrAl/ocel 1.4301 na rozhraní mezi povlakem (vrchní část) a podložkou (spodní část), zvětšení 100×

2.4.3. Rozbor chemického složení

Stanovení chemického složení povlaku probíhalo na skenovacím elektronovém mikroskopu JEOL JSM-6460LV pomocí přídavného energiově disperzního spektrometru EDAX APOLLO XL. Tato metoda, která pro vyhodnocení chemického složení využívá vznikající charakteristické rentgenové záření, se nazývá energiově disperzní spektroskopie (EDS). Zkoumané vzorky musejí být z vodivého materiálu, aby nedocházelo k nahromadění elektronů na jejich povrchu. To by mělo za následek zkreslení výsledného obrazu. Vzorky tedy byly před samotnou analýzou v elektronovém mikroskopu pouhličeny. Správnost chemického složení byla posuzována porovnáním získané křivky z energiově disperzního spektrometru s ideální křivkou pro daný materiál. Ideální křivky jednotlivých materiálů jsou obchodním tajemstvím společnosti Solar Turbines a z toho důvodu nejsou součástí této práce.

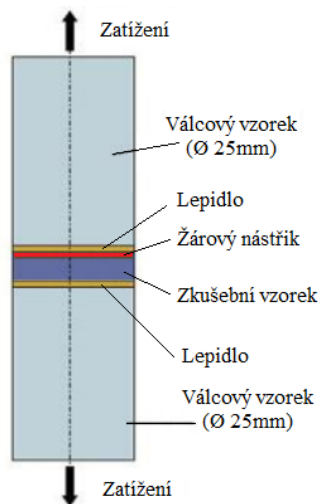
2.4.4. Měření tvrdosti

Pro hodnocení tvrdosti žárového nástřiku byla použita zkouška podle Rockwella se stupnicí B v souladu s normou ASTM E18. Tato zkouška spočívá v zatlačování vnikacího tělesa – v tomto případě kuličky z karbidu wolframu o průměru 1,5875 mm – do zkoušeného materiálu. Výsledná tvrdost se zjišťuje z rozdílu hloubky vtisku při působení předběžné síly a při odlehčení. [5]

U každého vzorku bylo naměřeno celkem 12 hodnot, ze kterých byla pro zvýšení přesnosti měření největší a nejmenší naměřená hodnota odebrána. Výsledná tvrdost povlaku byla určena aritmetickým průměrem ze zbývajících hodnot společně s určením směrodatné odchylky. Měření tvrdosti probíhalo na přístroji TRU-BLUE II od společnosti United.

2.4.5. Zkouška přilnavosti nástřiku

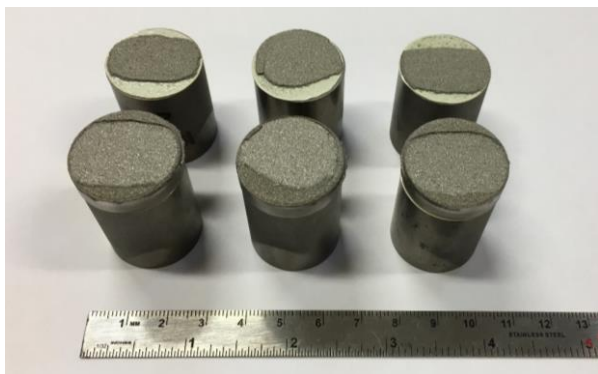
Pro hodnocení přilnavosti žárového nástřiku k základnímu materiálu byla použita tzv. zkouška přilnavosti. Tato zkouška spočívá v nalepení zkušební vzorku mezi dva válcové protikusy a následném namáhání tohoto systému tahovým napětím (viz obrázek 6).



Obr. 6. Schéma zkoušky přilnavosti [4]

Pro spojení vzorku s protikusy bylo použito lepidlo FM-1000. Za účelem vytvrzení lepidla byly vzorky umístěny do horkovzdušné trouby po dobu 150 minut při teplotě 200 °C. Zkouška byla prováděna ve výzkumném středisku společnosti Solar Turbines v San Diegu na přístroji INSTRON 5982 v souladu s normou ASTM C633. Po přetržení vzorku bylo důležité vyhodnotit, zda došlo k přerušení spoje na rozhraní povlak – základní materiál (adhezní porušení), případně uvnitř povlaku (kohezní porušení). Výsledné porušení může být tvořeno i kombinací těchto dvou případů (adhezně-kohezní porušení). Pokud by došlo k odtržení lepidla od vzorku předtím, než k odtržení povlaku od základního materiálu, zkouška by byla považována za neplatnou. Hodnota přilnavosti povlaku je určena jako podíl maximálního zatížení a průřezu vzorku v místě lomu. [4]

Na obrázku 7 je fotografie zkušebních vzorků po provedení zkoušky přilnavosti.



Obr. 7. Zkušební vzorky s nástřikem NiCrAl na podložce z oceli 1.4301 po provedení zkoušky přilnavosti

2.5. Ekonomické zhodnocení

Vzhledem k zachování parametrů žárového nástřiku pro nově testovaný materiál bylo provedeno ekonomické zhodnocení pouze z pohledu odebíraného množství a ceny jednotlivých materiálů. Ekonomické zhodnocení změny materiálu z NiCrAl na FeCrAl je uvedeno v tabulce 5.

Tabulka 5. Ekonomické zhodnocení změny materiálu z NiCrAl na FeCrAl

Druh použitého drátu	Očekávaná roční spotřeba [kg]	Cena za 1 kg [Kč]	Cena drátu/rok [Kč]	Výsledná úspora/rok [Kč]
NiCrAl	5 625	1 289,68	7 254 425	1 829 428
FeCrAl	5 625	964,44	5 424 998	

Z tabulky vyplývá, že pokud by firma přešla na materiál FeCrAl, ročně by ušetřila necelé 2 miliony korun. Toto zhodnocení se však týká pouze opravárenského centra v Žatci. Pokud by se testovaný drát osvědčil v reálném provozu, uvažovala by společnost Solar Turbines o použití materiálu FeCrAl v opravárenských centrech po celém světě. V takovém případě by celosvětová spotřeba byla téměř desetinásobná oproti aktuální spotřebě v žateckém závodě, čímž by se výsledná roční úspora blížila 20 milionům Kč.

3. Diskuze výsledků

Testování požadovaných vlastností žárového nástřiku u materiálů NiCrAl a FeCrAl probíhalo na vzorcích ve formě kvádrů a válečku, jejichž rozměry byly stanoveny interní směrnici společnosti Solar Turbines. Jedna sada vzorků byla vyrobena z korozivzdorné austenitické oceli 1.4301, zatímco druhá sada z litiny s kuličkovým grafitem s feriticko-perlitickou matricí. Před žárovým nástřikem bylo nutné zajistit požadovanou drsnost povrchu základního materiálu, a proto byly vzorky otryskány abrazivem Al₂O₃. V tabulce 6 jsou uvedeny naměřené hodnoty drsností testovaných vzorků ve srovnání s požadovanou hodnotou.

Tabulka 6. Naměřené hodnoty drsností ve srovnání s požadovanou hodnotou

Základní materiál	Požadovaná hodnota drsnosti Ra [μm]	Průměrná hodnota Ra [μm]
Ocel 1.4301	≥ 3,2	7,6 ± 0,4
Litina		7,1 ± 0,7

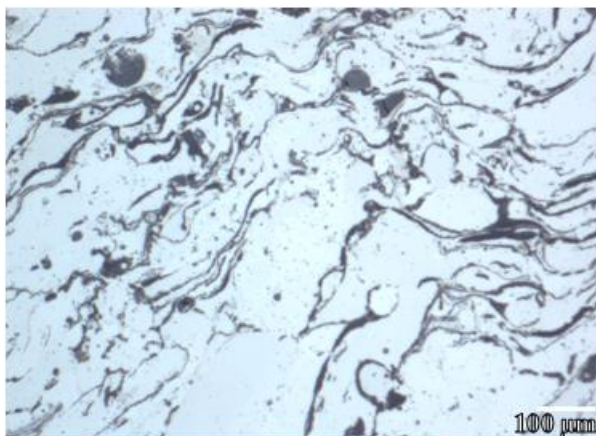
Z tabulky vyplývá, že u obou sad testovaných vzorků bylo dosaženo požadované hodnoty drsnosti Ra 3,2 μm. Po naměření drsnosti bylo přistoupeno k provedení žárového nástřiku, přičemž procesní parametry byly u obou testovaných materiálů totožné. Při vyhodnocování jednotlivých vzorků byla použita vnitřní směrnice společnosti Solar Turbines, která proces kontroly rozděluje celkem na 6 částí: vizuální kontrola, metalografický rozbor, rozbor chemického složení, měření tloušťky povlaku, tvrdosti a adhezně/kohezní pevnosti.

Během vizuální kontroly došlo k vyhodnocení celistvosti povlaku. U všech testovaných vzorků byl nástřík nanesen rovnoměrně po celé ploše a vzorky nevykazovaly stopy po trhlinách, dutinách ani jiných defektech. U některých vzorků v důsledku odklonu trysky od normály povrchu základního materiálu vznikl přestřík na hranách, což však nijak neovlivnilo vyhodnocované vlastnosti. Po vizuální kontrole následovalo měření tvrdosti HRB. Výsledky tohoto měření jsou uvedeny v tabulce 7.

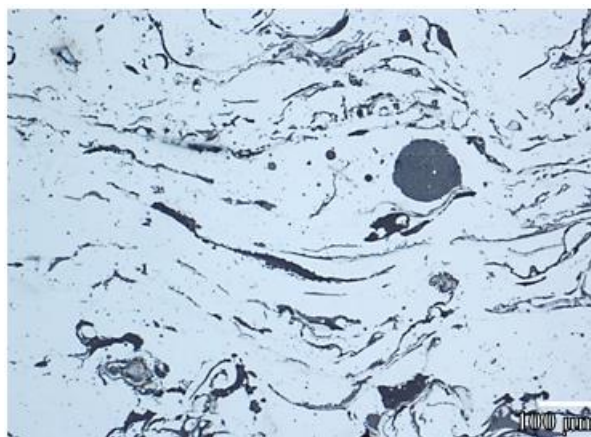
Tabulka 7. Naměřené hodnoty tvrdosti HRB ve srovnání s požadovanou hodnotou

Materiál drátu	Základní materiál	Požadovaná hodnota tvrdosti HRB	Průměrná hodnota tvrdosti HRB
NiCrAl	Ocel	60 - 95	82,7 ± 6,4
	Litina		80,5 ± 5,8
FeCrAl	Ocel		85 ± 3,9
	Litina		84,1 ± 4,2

Naměřené hodnoty tvrdostí u všech zkoumaných vzorků ležely v požadovaném rozmezí 60 – 95 HRB. Největší tvrdosti bylo dosaženo u nástříku FeCrAl na ocelové podložce (85 HRB), zatímco nejnižší tvrdost vykazoval nástřík NiCrAl na podložce z litiny (80,5 HRB). Následně se přistoupilo k metalografickému rozboru na světelném mikroskopu, který měl za cíl určit tloušťku povlaku, pórovitost, množství oxidů, množství nenatavených částic a posoudit kontaminaci mezi podložkou a nástříkem. Na obrázcích 8 a 9 je znázorněn rozdíl v mikrostruktuře vzorků NiCrAl a FeCrAl na ocelové podložce při stejném zvětšení. Z obrázku vyplývá, že rozdíly v mikrostruktuře jsou minimální. Materiál FeCrAl vykazuje větší míru uspořádání deformovaných částic. V tabulce 8 jsou poté shrnuty jednotlivé charakteristiky metalografického rozboru pro všechny zkoumané vzorky.



Obr. 8. Mikrostruktura povlaku NiCrAl na ocelové podložce, zvětšení 500×



Obr. 9. Mikrostruktura povlaku FeCrAl na ocelové podložce, zvětšení 500×

Tabulka 8. Charakteristiky získané z metalografického rozboru ve srovnání s požadovanými hodnotami

Zjišťovaná charakteristika	NiCrAl		FeCrAl		Přípustná hodnota
	Podklad ocel	Podklad litina	Podklad ocel	Podklad litina	
Tloušťka [mm]	1,25 ±0,08	1,26 ±0,06	1,34 ±0,14	1,20 ±0,05	1,10 – 1,40
Pórovitost [%]	0,31 ±0,1	0,40 ±0,17	0,56 ±0,25	0,33 ±0,25	≤ 8
Množství oxidů [%]	5,15 ±2,53	5,37 ±1,04	2,75 ±0,60	3,94 ±1,89	≤ 25
Množství nenatavených částic [%]	5,75 ±0,55	5,92 ±0,80	5,25 ±0,75	4,75 ±0,43	≤ 10
Kontaminace na rozhraní mezi podkladem a nástříkem [%]	14,0 ±7,0	11,3 ±3,9	12,0 ±3,7	13,7 ±5,0	≤ 25

Z výsledků uvedených v tabulce 8 vyplývá, že všechny vzorky splnily požadavky stanovené specifikací. Po metalografickém rozboru bylo přistoupeno ke stanovení chemického složení nástříku na elektronovém mikroskopu. Správnost chemického složení byla vyhodnocována porovnáním získané křivky z energiové disperzního spektrometru s ideální křivkou daného materiálu. Ve všech případech došlo k dosažení požadovaného chemického složení. Ideální křivky testovaných materiálů jsou majetkem společnosti Solar Turbines a proto nejsou součástí této práce.

Jako poslední proběhlo stanovení přílnavosti žárového nástříku k základnímu materiálu. U všech zkoumaných vzorků došlo k porušení uvnitř nástříku – jedná se tedy o kohezní porušení. Výsledky tohoto měření pro jednotlivé vzorky jsou uvedeny v tabulce 9.

Tabulka 9. Kohezní pevnost testovaných vzorků

Materiál drátu	Základní materiál	Požadovaná hodnota kohezní pevnosti [MPa]	Naměřená průměrná hodnota kohezní pevnosti [MPa]
NiCrAl	Ocel	≥ 40	43,76 ± 1,91
	Litina		46,53 ± 4,35
FeCrAl	Ocel		37,56 ± 3,62
	Litina		43,03 ± 3,74

Z tabulky vyplývá, že kromě žárového nástřiku FeCrAl na ocelové podložce došlo u všech testovaných vzorků ke splnění stanovených limitů kohezni pevnosti. Po konzultaci s výzkumným ústavem společnosti Solar Turbines bylo i vzhledem k naměřené hodnotě kohezni pevnosti u nástřiku FeCrAl na litinové podložce rozhodnuto, že naměřená hodnota 37,56 MPa u vzorku FeCrAl na ocelové podložce bude akceptována.

4. Závěr

Předkládaná práce hodnotí optimalizaci žárového nástřiku elektrickým obloukem při generální opravě komponentů průmyslových plynových turbín změnou používaného materiálu. Byly testovány materiály NiCrAl (původně používaný materiál) a FeCrAl (experimentální materiál) na dvou různých typech podložek. Pro vyhodnocení byly využity techniky elektronové a světelné mikroskopie a mechanické zkoušky.

Po depozici žárového nástřiku následovalo testování specifických vlastností jednotlivých vzorků. Cílem zkoušek bylo zjistit, zda experimentální materiál FeCrAl dosahuje vlastností materiálu NiCrAl, který je používán v současnosti a zda oba zkoumané materiály splňují limity pro vlastnosti určené specifikací společnosti Solar Turbines. Zároveň byla zaměřena pozornost na to, jakým způsobem ovlivňuje materiál podložky výsledné vlastnosti žárového nástřiku.

S ohledem na výsledky provedených testů lze konstatovat, že materiál FeCrAl se nejenom blíží vlastnostem materiálu NiCrAl, ale v mnoha vlastnostech jej dokonce převyšuje. Materiál FeCrAl tak splnil veškeré požadavky, kterých bylo nutné dosáhnout. Pouze u žárového nástřiku FeCrAl na podložce z oceli 1.4301 nebylo dosaženo kohezni pevnosti 40 MPa, nýbrž hodnoty 37,56 MPa. Po dohodě s pracovníky výzkumného centra společnosti Solar Turbines v San Diegu bylo i s přihlédnutím k výsledkům zkoušky přílnavosti u litinové podložky stanoveno, že tato hodnota bude akceptována.

V této práci došlo zároveň ke kontrole vlastností materiálu NiCrAl, který je v současné době společností Solar Turbines používán. Daný materiál splnil veškeré požadavky, které byly určeny vnitřní směrnici, čímž byla ověřena správnost procesu.

Vliv podkladového materiálu na výsledné vlastnosti žárového nástřiku by měl být zanedbatelný, jelikož podstatata spojení povlaku se substrátem vychází z mechanického zakotvení částic. Tato teorie byla pro testované podkladové materiály v zásadě potvrzena, jelikož vlastnosti stejného materiálu použitého při žárovém nástřiku na dvou různých podložkách byly téměř totožné. Vzniklé odchylky mohly být způsobeny rozdílnou tepelnou vodivostí litiny a oceli, která má vliv na rychlost tuhnutí vznikajícího povlaku.

V návaznosti na konzultaci výsledků této práce s výzkumným ústavem společnosti Solar Turbines v San Diegu byl navržen další postup testování, který bude spočívat v nanesení žárového nástřiku FeCrAl na konkrétní díly plynové turbíny. Tyto komponenty budou následně umístěny do testovací turbíny a nechají se určitý počet cyklů v provozu. Pokud by výsledky testování vyšly podle

očekávání a společnost by se rozhodla pro záměnu používaného drátu, celková roční úspora by pro žatecký závod činila téměř 2 miliony korun. V případě, že se testovaný drát osvědčí v reálném provozu, uvažuje společnost Solar Turbines o jeho použití v opravárenských centrech po celém světě. V takovém případě by celosvětová spotřeba byla téměř desetinásobná oproti aktuální spotřebě v žateckém závodě, čímž by se roční úspora blížila 20 milionům Kč.

Seznam symbolů

$hm. \%$	hmotnostní procenta
X	množství nenatavených částic (%)
P_1	počet uzlů zasahujících do nenatavené částice
P_2	počet uzlů dotýkajících se nenatavené částice
EDS	energieově disperzní spektrometrie

Literatura

- [1] HARDWICKE, Canan U. a Yuk-Chiu LAU. Advances in Thermal Spray Coatings for Gas Turbines and Energy Generation: A Review. *Journal of Thermal Spray Technology* [online]. 2013, **22**(5), 564-576 [cit. 2018-03-18]. DOI: 10.1007/s11666-013-9904-0. ISSN 1059-9630. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1007/s11666-013-9904-0>
- [2] PAWŁOWSKI, Lech. *The science and engineering of thermal spray coatings*. 2nd ed. Hoboken, NJ: Wiley, 2008. ISBN 978-0-471-49049-4.
- [3] TUCKER, Robert C. Thermal Spray Coatings. COTELL, C.M., J.A. SPRAGUE a F.A. SMIDT. *ASM Handbook, Volume 5: Surface Engineering*. USA: ASM International, 1994, s. 497-509. ISBN 978-0-87170-384-2.
- [4] HOUDKOVÁ ŠIMŮNKOVÁ, Šárka, Radek ENŽL a Olga BLÁHOVÁ. *Žárové nástřiky : moderní technologie povrchových úprav* [online]. 2003 [cit. 2018-03-18]. Dostupné z: <https://web.archive.org/web/20071121025027/http://www.kmm.zcu.cz:80/CD/con-tent/index.html>
- [5] FIALA, Jaroslav, Pavol ŠUTTA a Václav MENTL. *Struktura a vlastnosti materiálů*. Praha: Academia, 2003. ISBN 80-200-1223-0.