

Oponentský posudek

na
disertační práci Ing. F. Zahálky

„Studium vlastností vybraných HP/HVOF nástřiků“.

a) Zhodnocení významu pro obor

Přestože je práce nazvána velmi obecně „Studium vlastností vybraných HP/HVOF nástřiků“, je zacílena na možnosti aplikace na HP/HVOF nástřiků na komponenty parních turbin. Význam pro obor žárových nástřiků má jak nalezení optimálních nástřikových parametrů technologie HP/HVOF pro tři různé materiály povlaků, tak to, že byla důsledně sledována jejich použitelnost pro komponenty parních turbin.

Můj názor je, že testy teplotního cyklování a koroze jsou velmi přísné a to, že - cituji z práce - „Experimentální výsledky získané v této práci zatím neprokázaly vhodnost použití hodnocených žárově stříkaných povlaků pro aplikace v podmínkách vysokých teplot za spolupůsobení páry s ohledem na výsledky pre-testů tepelně-mechanické únavy (TMF) a korozních testů (SCW)“, neznamená, že tyto nástřiky jsou málo kvalitní. Byla prostudována řada jejich dalších vlastností, které mají s parními turbinami méně těsnou souvislost: Odolnost proti abrazi za pokojové teploty, mikrotvrdost, vnitřní pnutí, fázové transformace, atd. Z těchto hledisek jsou nástřiky provedené optimálními parametry velmi dobré a při současném stavu techniky a poznatků představují dosažitelnou špičkovou úroveň.

b) Vyjádření k postupu řešení problému, k použitým metodám, ke splnění stanoveného cíle

Postup řešení byl zvolen vhodně, měření vlastností nástřiků vždy předcházely důkladný rozbor mikrostruktury a obojí bylo posléze diskutováno v širokých souvislostech.

Použité metody byly vhodné. Jedná se o standardní metody, které jsou ve světě rutinně aplikovány. Problematika nevyžadovala od autora disertace přenesení nějaké metody používané např. v jiné části materiálovědného oboru do oblasti žárových nástřiků.

Eventuální výjimkou je metoda Smitweld. Podle mého názoru je trochu sporné, zda tato metoda je ideální pro hodnocení nástřiků na podložkách. Rychlý ohřev elektrickým proudem může mj. vyvolat např. objemovou el. polarizaci nebo podobné fyzikální jevy na rozhraní podložky a nástřiku (jde o dva materiály, jež nemají zcela shodnou elektrickou vodivost), které je navíc vždy do nějaké míry zoxidované. Tyto faktory mohou přispívat k poškození vzorků a podmínky testu tak stojí ještě výrazněji proti použití nástřiků než samotná realita v provozních podmínkách parní turbíny. Chápu ale, že lepší přiblížení experimentálních podmínek praktickému namáhání v provozu zde asi není možné.

Stanovené cíle, tak jak jsou rozepsány na straně 22 až 23, byly splněny.

c) Stanovisko k výsledkům disertační práce a původního konkrétního přínosu předkladatele

Výsledky práce přináší zajímavou kombinaci optimalizace parametrů nástřiků metodou objektivní komparace (MOK) a metodou „návrh experimentu“ (DOE). Tato druhá metoda, ačkoli nebyla z různých důvodů uplatněna v plném rozsahu, přináší řadu výhod,

pokud je nutné nalézt vztah mezi řadou proměnlivě nastavitelných parametrů. Nevýhodou metody DOE automatické nastavení faktorů při návrh experimentu (designu) na takové úrovni, při kterých nemusí být získány požadované odezvy. Při metodě MOK je to vždy otázkou zkušeností navrhovatele - nastavit úroveň proměnných faktorů sám tak, aby požadované odezvy získány byly. To bylo předkladatelem velmi dobře splněno.

Konkrétní přínos předkladatele spočívá zejména v tom, že pro řešení disertační práce byly vyvinuty a odzkoušeny metody zkoumání zároveň stříkaných povlaků:

- metodika hodnocení abrazivního opotřebení dle ASTM G-65
- metodika optimalizace pomocí metody DOE
- přípravek pro měření zbytkových napětí povlaků
- metodika pro reprodukovatelné lepení vzorků pro zkoušku tahem dle ČSN EN 582

d) Případné další vyjádření k systematičnosti, přehlednosti, formální úpravě a jazykové úrovni

Systematičnost a přehlednost práce jsou na velmi dobré úrovni. K formální a jazykové stránce drobné výhrady mám. Text obsahuje poměrně dost chyb, které mají charakter překlepů či drobných stylistických neobratností, nejde tedy o zásadní věcné chyby. Je ale škoda, že trochu ovlivňují celkový jinak velmi dobrý dojem z disertační práce.

e) Vyjádření k publikacím disertanta

V seznamu použité literatury jsou přinejmenším čtyři články v recenzovaných zahraničních časopisech, Ref. [21], [22], [54] a [66]. Možná jich existuje více anebo disertant jiné své práce může považovat za důležitější z hlediska vztahu k disertaci. Bylo by přínosné seznam takových článků přímo v práci uvést. V situaci, kdy ke zvyklostem pracoviště patří i vypracovávání interních Výzkumných zpráv a Technických zpráv (hojně v práci citovaných) je třeba považovat disertantovu publikační činnost za velmi dobrou.

f) Vyjádření oponenta, zda doporučuje či nedoporučuje disertační práci k obhajobě

Předložená disertační práce Ing. F. Zahálky „Studium vlastností vybraných HP/HVOF nástřiků“ je kvalitní a přes výše vyjmenované drobné nedokonalosti představuje velmi zdařilé zpracování rozsáhlého souboru výsledků řady měření. Doporučuji Komisi pro státní doktorskou zkoušku předloženou práci přijmout.

V Praze, 9. 5. 2012

Ing. Pavel CTIBOR, Ph.D.

Ing. Jiří Nohava, PhD.
CSM Instruments
Rue de la Gare 4
2034 Peseux
Switzerland

Západočeská univerzita v Plzni
děkanát Fakulty strojní – Dana Kučerová
Univerzitní ul. č 22
306 14 Plzeň
Česká republika

V Peseux dne 2. května 2012

Oponentský posudek disertační práce

Název práce: Studium vlastností vybraných HP/HVOF nástřiků

Autor práce: Ing. František Zahálka

Školitel: doc. Ing. Olga Bláhová, PhD.

a) Zhodnocení významu pro obor a aktuálnost práce

Předložená disertační práce se zabývá studii vybraných povrchových vrstev připravených metodami High Pressure/High Velocity Oxy-Fuel (HP/HVOF) za účelem optimalizace těchto vrstev pro průmyslové použití. Toto téma je v současnosti vysoce aktuální, neboť povrchové úpravy jsou v mnoha oblastech nezbytné pro ochranu materiálu zejména před korozi, opotřebením a působením vysokých teplot, případně kombinací těchto vlivů. Použití povrchových úprav umožňuje významně zvýšit životnost namáhaných součástí a použít nových technologií, vykazujících vyšší účinnost za současného snížení provozních nákladů. Žárově nanášené vrstvy jsou používány v mnoha průmyslových odvětvích, především v leteckém, automobilovém a energetickém průmyslu, ale např. i v průmyslu papírenském. Studium vlastností těchto vrstev a jejich závislosti na parametrech nanášení představuje časově a technologicky náročnou záležitost, na kterou jsou vynakládány nemalé finanční prostředky. Téma disertační práce lze proto považovat jako aktuální, s významným přínosem zejména pro průmyslové aplikace.

Samotná práce se zabývá třemi typy povrchových vrstev, tzv. cermety, a vztahy mezi parametry nanášení a jejich výslednými vlastnostmi a strukturou. Práce přináší zatím první takto kompletní studii na těchto typech materiálů a její výsledky jsou důležitým příspěvkem k objasnění problematiky nanášených povrchových vrstev za účelem ochrany proti korozi a opotřebením a to i za vysokých teplot.

b) Vyjádření k řešení problému, použitým metodám a splnění stanovených cílů

Uvedená práce se zabývá optimalizací tří konkrétních typů HP/HVOF povrchových vrstev (Cr_3C_2 -25%CoNiCrAlY, WC- Cr_3C_2 -Ni a CoNiCrAlY) pro antikorozi a otěrvzdorné aplikace. Celá disertační práce je napsána srozumitelně a je členěna do kapitol, případně podkapitol. Práce obsahuje seznam literatury a anglický abstrakt, který umožní seznámení s prací i mezinárodní odborné veřejnosti.

Kapitoly 1 a 2 shrnují dosavadní stav výzkumu v dané oblasti, uvádí výsledky dostupné v literatuře a hlavní problémy při nanášení a charakterizaci vrstev HP/HVOF. Kapitola 1 také vytyčuje hlavní cíle předkládané práce: ucelený experimentální program pro optimalizaci parametrů nanášení daných vrstev a srovnání dvou metod statistického navržení experimentu.

Kapitola 3 uvádí popis metody a parametrů nanášení, dále je uveden seznam experimentálních metod, které byly použity k hodnocení vlastností studovaných materiálů. Tento seznam je poměrně rozsáhlý a je zřejmé, že jeho provedení bylo dosti časově náročné. Kromě běžných metod jako jsou např. mikrotvrdość a pórovitost autor použil i metod speciálních, mezi které patří měření korozní odolnosti a měření odolnosti proti teplotnímu šoku.

Kapitola 4 je pro svou rozsáhlost členěna do podkapitol, které se zabývají postupně výsledky, získanými na jednotlivých typech vrstev. Tato část práce srovnává výsledky získané metodou objektivní komparace a sleduje vliv parametrů nanášení na hlavní charakteristiky vrstev jako jsou mikrotvrdość, drsnost, pórovitost, struktura a odolnost proti opotřebení.

Kapitola 5 se zabývá návrhem a provedením experimentálních prací metodou Design of Experiment (DoE) a uvádí srovnání účinnosti, resp. časové a technologické náročnosti metody objektivní komparace a metody DoE. Z tohoto srovnání vyplývá, že metoda DoE je sice náročná na prvotní investice, nicméně posléze přináší vyšší efektivitu práce, tj. menší počet experimentů a rychlejší vyhodnocení výsledků ve srovnání s metodou objektivní komparace.

Kapitoly 6 a 7 uvádí výsledky testů tepelně mechanické únavy a testů korozní zkoušky za vysokých teplot. Zde se jedná o poměrně speciální zkoušky, které jsou často používány v průmyslu a jejich výsledky jsou tedy významných přínosem v dané oblasti. Tato část práce byla věnována především určení mechanismů porušování vrstev a jejich závislosti na struktuře vrstev.

V kapitole 8 je provedena ucelená diskuze výsledků, která uvádí vysvětlení a zdůvodnění sledovaných jevů a získaných poznatků. Jsou zde zdůvodněny vlivy teploty, rychlosti částic a délky barelu na mechanické vlastnosti a pórovitost vrstev a na odolnost těchto vrstev proti opotřebení. Mezi důležité poznatky patří, že odolnost proti opotřebení souvisí s tvrdostí vrstev, nicméně tato odolnost je závislá i na dalších vlastnostech jako např. charakter zbytkových pnutí či pórovitost. Samostatně je pak diskutováno srovnání metod objektivní komparace a metody DoE a výsledky tepelné únavy.

Kapitola 9 shrnuje hlavní poznatky, získané v průběhu celé disertační práce a kapitola 10 uádí seznam literatury včetně publikací autora.

Splnění stanovených cílů

Na základě srovnání cílů práce, vytyčených v Kapitole 1, a závěrů práce uvedených v Kapitole 9 konstatují, že tyto cíle byly splněny.

c) Vyjádření k závěrům práce a původního přínosu disertanta k dané problematice

Závěry práce jsou uvedeny v Kapitole 9 a obsahují podrobný seznam parametrů a jejich vliv na vlastnosti sledovaných vrstev. Autor přitom zdůrazňuje, které parametry mají zásadní vliv na vlastnosti daných vrstev a které parametry mají pouze méně významný či prakticky žádný vliv na výsledné vlastnosti daných vrstev. Tímto umožňuje dobrou orientaci ve výsledcích své práce a současně usnadňuje jejich použití v průmyslu.

Autor ve své práci přinesl původní výsledky, které dosud nebyly dostupné v odborné literatuře a tím přispěl významně jak k rozvoji tohoto oboru, tak k jeho užšímu propojení s průmyslem.

d) Systematičnost, přehlednost a formální připomínky k práci

Předkládaná práce byla zpracována systematicky a byla přehledně členěna do kapitol, resp. podkapitol. Autor srozumitelně vysvětlil použité experimentální metody, uvedl jejich výsledky a tyto posléze uceleně diskutoval. K jazykové úrovni práce nemá oponent výhrad.

Formální připomínky

- V práci je často použito jednotky tlaku *psi* a jednotky délky v palcích. Vzhledem k tomu, že tato jednotka se používá převážně v USA a Anglii, bylo by v práci publikované v České republice vhodné používat jednotky SI, které jsou v této zemi běžné.
- V několika kapitolách se vyskytují grafy, ve kterých jsou dva body spojeny úsečkou. Dva body lze proložit i jinou než lineární závislostí. Pokud je obtížné získat další body do grafu pro potvrzení předpokládané závislosti, je lépe tyto body neprokládat.
- Kapitola 3.1 obsahuje několik tabulek, kde se vyskytuje údaj o otáčkách šneku podavače prášku v počtu otáček za minutu. V kapitole 3.3 je popsáno měření podávaného prášku, nejsou však uvedeny hodnoty podávací rychlosti (feed rate), která se běžně udává u metod žárového nanášení. Pro lepší porozumění by bylo vhodné uvést v tabulce tuto hodnotu spíše než rychlost otáček podávacího šneku.

e) Publikace autora

Autor prokázal dostatečnou znalost tématu a výsledky své práce publikoval v řadě výzkumných zpráv, článků v mezinárodních časopisech a příspěvcích na konferencích. Mezi nejvýznamnější patří zejména publikace v časopise *Key Engineering Materials* a prezentace na konferencích *International Thermal Spray Conference*, která patří k nejdůležitějším setkáním odborníků v dané oblasti.

f) Vyjádření oponenta

Autor prokázal schopnost zpracovat dané téma jak po stránce rešerše, tak po stránce experimentální a teoretické. Své výsledky systematicky a srozumitelně prezentoval jak v uvedené práci, tak v renomovaných odborných časopisech a na mezinárodních konferencích. Podaná práce tedy splňuje všechny obsahové i formální požadavky kladené na doktorské disertační práce, proto ji doporučuji k obhajobě a po jejím úspěšném obhájení doporučuji udělit titul Ph.D.

g) Dotazy

- **Dotaz 1:** Autor na několika místech uvádí, že vlastnosti vrstev závisí na teplotě a rychlosti částic. Ve výčtu experimentálních metod však není explicitně uvedeno, jak byly tyto dva parametry určeny. Bylo by proto možné objasnit, jak byla rychlost a teplota částic měřena či vypočtena, případně zda byl použit přístroj na měření těchto hodnot v průběhu nanášení?
- **Dotaz 2:** V kapitole 3.1, která se zabývá metodou objektivní komparace, je uvedeno několik tabulek, na jejichž základě byla tato metoda prováděna. Tabulky obsahující údaje tlaku ve spalovací komoře a ekvivalentní poměr jsou však neúplně vyplněné. Mohl by autor vysvětlit, proč u těchto tabulek jsou vyplněny pouze některé buňky, případně jaký byl důvod použití pouze cca poloviny kombinace možných parametrů?
- **Dotaz 3:** Při porovnání metody objektivní komparace a metody DoE v Kapitole 5 resp. Kapitole 8 není zcela zřejmé, zda by metoda DoE byla pro uvedený účel, tj. optimalizaci parametrů nanášení sledovaných vrstev, efektivnější než metoda objektivní komparace. Bylo by možné odhadnout, o

kolik procent by byl čas potřebný k provedení celé práce kratší, pokud by se používala metoda DoE místo metody objektivní komparace?

- **Dotaz 4:** V Závěru disertační práce jsou shrnuty důležité poznatky, získané v průběhu práce. Jejich výčet je systematicky členěn, přesto však přesahuje pět stránek. Bylo by možné v několika větách shrnout, které parametry měly nejdůležitější vliv na kvalitu sledovaných vrstev a proč?



Jiří Nohava