

# Oponentský posudek

doktorská disertace ve studijním oboru Inženýrství speciálních technologií a materiálů

Ing. Aleš Glanc

## *Studium žárově stříkaných povlaků pro otěruvzdorné aplikace*

Obor doktorského studia: 2303V015 Inženýrství speciálních technologií a materiálů  
Předložená disertace: ZČU v Plzni, Fakulta strojní, KMM  
Školitel: doc. Ing. Olga Bláhová, Ph.D. – ZČU v Plzni, FS  
Oponent: doc. RNDr. Josef Kasl, CSc. – Výzkumný a zkušební ústav Plzeň s.r.o.

---

Práce, včetně příloh, má 162 stran. Obsahuje 34 tabulky a 84 obrázky včetně grafů. Formálně je práce rozdělena do tří částí. Po obecném Úvodu následuje Teoretická část (celkem 58 stran), která je rozdělena do čtyř kapitol. V ní autor podrobně rozebírá metody žárových nástřiků a využití laserů ke kalení, navařování a přetavování. Teoretická část je zakončena formulací cílů disertační práce. Experimentální část je uvozena informacemi o přípravě dvou nástřiků metodou HVOF, které byly použity k experimentu. Doktorand vybral dva druhy materiálů - kobaltové superslitiny, a to Hastelloy C-276 a CoCrTaAlCSiY. Následuje popis metodik přípravy metalografických vzorků, měření mikrotvrdomosti, rentgenové difrakční analýzy, měření pórovitosti a měření zbytkových napětí. Tato část by měla být převážně spíše obsažena v teoretické části. Další kapitola je věnována výběru laserovému zpracování povlaků. Pro nástřiky bylo aplikováno dvanáct resp. osm variant parametrů. Na základě metalografického rozboru příčných řezů nástřiků byly pro každý typ vybrány dvě varianty reprezentující zhruba poloviční a celkové přetavení tloušťky nástřiku. Experimenty byly tedy provedeny na celkem třech vzorcích (bez tepelného a se dvěma typy laserového zpracování) pro každý nástřik. V další části jsou uvedeny výsledky vlastních rozborů (32 stran a 20 stran v příloze). Práce je uzavřena Diskusí a Závěrem (dohromady 3 stránky). V seznamu použité literatury je uvedeno 122 prací včetně deseti položek pocházejících z pracoviště autora a spolupracujících institucí.

### *a) zhodnocení významu pro obor*

Jednou z rozvíjejících se oblastí studia materiálů je výzkum nových technologických postupů povrchové úpravy. Široká pozornost je věnována jak oblasti žárových nástřiků, tak laserového zpracování. Tyto metody relativně nenáročně umožňují efektivně zvyšovat užité vlastnosti strojních dílů. Práce je zaměřena na zhodnocení vlivu kombinace obou těchto typů zpracování. Cílevědomé dosažení vhodné kombinace užitečných a technologických vlastností materiálu je podmíněno hlubším pochopením procesů probíhajících během jeho výroby a souvislostí mezi mikrostrukturou a výslednými vlastnostmi. Z tohoto pohledu je možné konstatovat, že předkládaná práce řešila aktuální a technicky důležitou problematiku vývoje technologie laserového tepelného zpracování HVOF nástřiků dvou kobaltových slitin.

### *b) vyjádření k postupu řešeního problému, k použitým metodám, ke splnění stanoveného cíle*

V práci jsou její cíle explicitně uvedeny v příslušné kapitole. Snahou bylo pro dva vhodné přídatné materiály používané pro technologie HVOF zlepšit jejich vlastnosti (zejména odolnost proti opotřebení) aplikací laserového zpracování. V rámci cílů jsou deklarovány i experimenty, které budou provedeny. Jedním z cílů bylo rovněž „porovnat

získané výsledky s jinými více probádanými materiály z oblasti HVOF nástřiků“. To je v diskusi splněno jen částečně a jen pro materiál Hastelloy C-276. V diskusi při zkoušce by bylo vhodné toto téma doplnit (viz položené otázky). S touto výhradou lze konstatovat, že cíle disertační práce byly splněny. Pro dosažení cílů byly zvoleny vhodné metody, které byly doktorandovi dostupné. Experimentální činnosti byly v plánovaném rozsahu provedeny, byť v případě některých z nich nejsou získané výsledky jednoznačné či kompletní (rtg fázová analýza, měření zbytkových napětí). Některé drobné výhrady a dotazy jsou uvedeny jako otázky do diskuse.

c) *stanovisko k výsledkům disertační práce a původního konkrétního přínosu*

Práce má charakter experimentálního vývoje technologického postupu laserového tepelného zpracování, kterým by bylo možné zlepšit odolnost proti opotřebením u dvou HVOF nástřiků. Zatímco u nástřiku Hastelloy C-276 se použitými parametry laserového zpracování tuto vlastnost zlepšit nepodařilo, u nástřiku CoCrTaAlCSiY ke zlepšení došlo. Autor se snaží na základě naměřených hodnot a literárních znalostí interpretovat dosažené výsledky. Jedná se o první krok v případném systematickém vývoji optimalizovaného technologického postupu. V tomto smyslu jsou autorovy přínosné zejména s ohledem na případné následující návazné práce.

d) *další vyjádření (k systematičnosti, přehlednosti, formální úpravě a jazykové úrovni disertační práce)*

Poznámky k formální úpravě. Práce je napsána přehledně a má logické členění, byť v některých pasážích je poněkud nekonvenční. V práci je jen minimum překlepů. Nicméně autor se nevyhnul některým stylistickým neobratnostem a terminologickým prohřeškům. Např. jediný výraz v ČJ je žárovevný (ne žárupevný), *spektrum* zpětně odražených elektronů namísto *obraz* (str. 42),  $\delta$ -fáze je rovněž řazena mezi TCP, na obr. 24 na str. 49 jsou nerezové oceli (austenitické?) zakresleny jako materiál s nižší žárovevností než 12%Cr ocel, název materiálu substrátu ve formě ČSN 11523 (str. 72) je nesprávný.

Pro čtenáře je poněkud nepřehledné, že tabulky a zejména obrázky jsou uváděny částečně v textu a částečně v příloze. Na druhou stranu jsou pro obrázky a tabulky uvedeny jejich soupisy. Poněkud nešťastná je volba stejných symbolů pro výsledky v bodových grafech a podobné barvy pro spojovací čáry.

Připomínky mám k formulaci závěrů, které obsahují nadbytečný popisný text do závěru nepatřící.

e) *vyjádření k publikacím disertanta*

V disertační práci je uvedeno pět vlastních citací, které se týkají řešené problematiky. Vesměš se jedná o konferenční příspěvky (tři tuzemské a jeden zahraniční a jeden publikovaný v řadě IOP Conference Series). Z názvu citací vyplývá, že doktorand průběžně publikoval získané výsledky.

f) *závěrečné vyjádření*

I přes uvedené připomínky po zodpovězení uvedených dotazů/námětů do diskuse **doporučuji disertační práci k obhajobě.**

*Otázky a náměty do diskuse:*

1) Co je míněno výrazem „rekrytalizace“ na str. 57 a dalších? Je pojem správný, pokud dochází k roztavení materiálu a fázovým přeměnám (překrytalizaci)?

2) podle výkladu na str. je vlnová délka (resp. frekvence), dána jednoznačným rozdílem dvou energetických hladin v atomu. Vlnová délka laseru použitého v práci je deklarována ( $808 \pm 10$ ) nm (str. 74). Jaké faktory obecně ovlivňují vlnovou délku emitovaných fotonů?

3) Jak byly vybrány parametry HVOF nástřiků studovaných materiálů?

4) Výsledky měření pórovitosti – text na str. 94: výchozí stav vyšší pórovitost ( $5,0 \pm 0,6$ ) % v CoCrTaAlCSiY ve srovnání s Hastelloy C-276, stejně tak pro T5 ( $1,8 \pm 0,6$ ) %. V grafu 46 na str. 96 a tabulce 26 jsou jiné hodnoty. Pod obrázkem je text, že pórovitost u CoCrTaAlCSiY je nižší než u Hastelloy C-276. Vysvětlete.

5) Výsledky měření mikrotvrdomosti - proč jsou hodnoty mikrotvrdomosti HV0,1 v substrátu pro varianty Hastelloy C-276 a CoCrTaAlCSiY rozdílné (obr. 48, str. 97)? Proč jsou hodnoty mikrotvrdomosti HV0,1 v Hastelloy C-276 pro obě varianty TZ stejné?

Je počet vtisků a jejich rozložení v matici 6x6 bodů dostatečně reprezentativní pro rozložení mikrotvrdomosti v nástřiku na větší vzdálenosti ve směrech x a y i co se týče hloubkového profilu?

6) Proč je detekován vysoký obsah C ve všech zkoumaných vzorcích Hastelloy C-276 a CoCrTaAlCSiY? Proč nebyla provedena WDX mikroanalýza?

7) RTG fázová analýza systému CoCrTaAlCSiY – je možné, aby v materiálu bylo ve vzorku T1 téměř 40 hm. % TaC (EDX mikroanalýza vyloučila přítomnost oxidů), pokud ve vstupním prášku je 8 hm. % Ta a (?) 3 hm. % C (tabulka 24, str. 121)? V diskusi se připouští, že se může jednat o TaO, avšak EDX mikroanalýzou nebyl žádný kyslík detekován (tabulka 20, str. 119)?

V Plzni dne 15. 1. 2020



doc. RNDr. Josef Kasl, CSc.

# Oponentní posudek

Disertační práce s názvem“ *Studium žárově stříkaných povlaků pro otěruvzdorné aplikace*“.

Autor (disertant): Ing. Aleš Glanc  
Školitelka: Doc. Ing. Olga Bláhová, Ph.D.  
Konzultantka: Ing. Šárka Houdková, Ph.D.

a) V práci jsou studovány nástřiky materiálů Hastelloy C-276 a CoCrTaAlCSiY realizované metodou HVOF, které byly poté částečně nebo úplně přetaveny Laserem. Práce byla zaměřena především na studium odolnosti takto připravených nástřiků vůči opotřebením – abrazi a erozi. Zevrubné hodnocení odolnosti vůči opotřebením bylo vhodně doplněno hodnocením struktury metodami světelné mikroskopie, SEM, EDS a XRD. Značný objem původních experimentálních dat je cenný jak pro rozvoj oboru, tak i z hlediska případných žádoucích aplikací.

b) K zvolenému postupu řešení mám tyto připomínky:

Teoretická část

Teoretická část je dle mého názoru zpracována spíše jako učební text, týká se to zejména kap. 2, 4 a z části i kap. 5. Hlavním výstupem předložené disertační práce je závislost otěruvzdornosti (odolnosti vůči opotřebením) na struktuře jednotlivých nástřiků, avšak kap. 5. 1. 1. X jsou naopak zpracovány příliš stručně, pro daný typ opotřebením chybí popis uplatňujících se mechanismů, přičemž je k dispozici dostatečné množství relevantní prací.

Experimentální část

V případě hodnocení struktury by bylo vhodné v některých případech použít leptání k vyvolání struktury.

V práci je používána EDS, konkrétně její liniové a plošné analýzy, které jsou z možných metod EDS nejméně přesné a v případě uhlíku v podstatě nemají žádnou vypovídací hodnotu. Koncentrace C uvedená v Tab. 39 neodpovídá realitě. Obecně lze tvrdit, že měření obsahů uhlíku metodou EDS má v nejlepším případě polokvantitativní charakter. V práci bylo využito i bodových analýz, viz obr. 79, avšak naměřené koncentrace nejsou uvedeny.

Na s. 31 autor uvádí, že laseru lze v materiálovém inženýrství využít ke kalení (obecněji k ohřevu v oblastech pod solidem, a tedy se jedná o některý z postupů tepelného zpracování), k navařování a k **přetavování**. Autor pro aplikované použití laseru z počátku používá pojmu přetavování a poté plynule přechází k tepelnému zpracování, což považuji za zcela nevhodné a může to vést k matení čtenáře. Např. 97 uvádí: „Vlivem tepelného zpracování došlo k růstu těchto dendritů, což se negativně projevilo na hodnotách mikrotvrdosti vzorků H6 a H8.“ Vlivem žádného z postupů obvyklého tepelného zpracování nelze dosáhnout zhrubnutí dendritů. Vzorky H6 a H8 byly částečně nebo úplně přetaveny a hrubost dendritické struktury závisí na lokálních podmínkách krystalizace. Kromě HAZ u nástřiků částečně přetavených máme co do činění s „licí“ (dendritickou, buněčnou?) strukturou, a navíc materiály jsou v metastabilní stavu. S dendritickou krystalizací úzce souvisí i dendritická segregace,

disertant tohoto termínu vůbec nepoužil a na druhé straně používá pojmy jako „meziprostor, pravidelně se střídající oblasti“.

**c)** Disertace obsahuje obsáhlý soubor původních experimentálních dat, která rozšiřují poznatky o vlivu přetavování laserem nástřiků zejména superslitiny CoCrTaAlCSiY na odolnosti vůči opotřebení. V práci je využívána široká škála experimentálních metod, které jsou k dispozici v regionu Plzně. Předpokládám, že větší část experimentů prováděl doktorand, v případě sofistikovanějších metod (EDS, XRD) pak v obvyklé spolupráci s „operátory“ přístrojů.

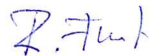
**d)** Práce je velice obsáhlá, obsahuje 162 číslovaných stran, z toho teoretická část a zbytečně detailní popis použitých experimentálních metod (metalografie, tvrdost, XRD) jsou až do strany 88. Popis výsledků a jejich rozbor zahrnuje asi 40 stran, z toho 10 stran jsou obrázky. Diskuse je velice stručná, chybí komplexnější rozbor vlivu všech studovaných parametrů na velikost opotřebení, v diskusi je minimum odkazů na některé z 122 uváděných zdrojů.

Práce je zpracována přehledně, k formální úpravě nemám připomínky, naopak tato je na velice dobré úrovni, zvláště uvažíme-li rozsah experimentů a celkový rozsah práce. Rovněž k jazykové úrovni práce nemám výhrady.

**e)** Doktorand většinu výsledků obsažených v předložené disertační práci průběžně publikuje spolu s kolektivem spolupracovníků. Počet publikací a jejich úroveň považuji za přiměřené.

**f)** Přes výše uvedené výhrady, které se z větší části netýkají vlastních výsledků, doporučuji v souladu se Vysokoškolským zákonem č. 111/1998 Sb. §47 disertační práci k obhajobě.

V Brně 16. 11. 2020  
R. Foret



Otázky k obhajobě.

- Uveďte alespoň porovnání rychlosti tuhnutí a chladnutí při HVOF a při laserovém přetavování.
- Z porovnání Obr. 53a, b versus Obr. 53 c až 53f, by bylo možné usuzovat, že opotřebení vz. H0 (až řezání, vytrhávání splatů) bude větší, než vz. H6, H8 (pouze rýhování). Hodnoty K uvedené na Obr. 52 tomu neodpovídají. Jaké je vysvětlení tohoto zdánlivého nesouladu?
- Lze v případě nástřiku C-276 vysvětlit rozdíly v hodnotách tvrdosti vz. H0 versus vz. H6, H8 (viz Obr. 48) pouze hrubostí dendritické struktury?
- Lze vysvětlovat přerozdělení prvků (Fe, Cr, Ni, Mo) na mezifázovém rozhraní substrát – nástřik, viz Obr. 75 pouze difúzí. Toto přerozdělení může vést k precipitaci nežádoucích fází ve slitině C-276 a k degradaci vlastností vytvořeného metalurgického spoje. Byla nežádoucí precipitace pozorována?

Obecně do širší diskuse. V úvodu téměř každé práce (nejen této disertační) je zdůrazňována aplikovatelnost získaných výsledků v moderní technice, což povede k.....Může se kolektiv řešící výše uvedenou problematikou pochlubit aplikací v ČR?