

OPONENTSKÝ POSUDEK DISERTAČNÍ PRÁCE

Název disertační práce: **Study of the real structure of laser-cladded steel**

Doktorand: **Ing. Karel Trojan**

Pracoviště: **Katedra inženýrství pevných látek, Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská České vysoké učení technické v Praze**

Oponent: **prof. Dr. Ing. Antonín Kříž, IWE**

Pracoviště: **Katedra materiálu a strojírenské metalurgie Fakulta strojní Západočeská univerzita v Plzni**

Posudek byl vypracován na základě dopisu Č. j.: 7023-V1/22/14922/Záb. o jmenování oponentem disertační práce Ing. Karla Trojana ze dne 15.6.2022.

V oponentském posudku se na základě pokynů pro vypracování vyjadřuji k:

- Aktuálnost tématu,
- Metody zpracování,
- Cíle disertační práce,
- Výsledky a vědecký přínos práce,
- Formální úprava disertační práce a její jazyková úroveň,
- Celkové zhodnocení disertační práce

Úvod posuzující aktuálnost zvoleného tématu

Disertační práce se věnuje technologii laser cladding s cílem vytvoření objemového materiálu nástrojové oceli typu AISI H13 se stejným cílem, jako mají „klasické“ aditivní technologie 3D tisku. Cílem posuzované disertační práce bylo popsat vliv této technologie na strukturu, zbytková napětí a další mechanické vlastnosti. Další, logická pozornost, s ohledem na plánované aplikace (např. vstřikovací formy), byla věnována procesu opotřebení. Pro experiment byly zvoleny dva podkladové materiály. Pro jednu vrstvu návaru byla použita ocel S355 a pro vícevrstvý návar to byla ocel AISI H11 (Wr. Nr. 1.2343). Ocel AISI H11 je zdůvodněna předpokládanou průmyslovou aplikací, ale bez hlubší aplikační vazby byla použita ocel S355, která má odlišné chemické složení a tím je také spojeno jiné chování při natavení, odvodu tepla i následných procesech chladnutí a tím se také dosáhnou odlišné výsledné vlastnosti. Nicméně aktuálnost tématu je i s ohledem na koncepci disertační práce velmi vysoká, protože autor v závěru svého experimentálního programu začlenil i opracování návaru a opětovné vyšetření vzniklého povrchu (zbytková napětí, nanotvrdost, rozložení strukturních fází, strukturní popis).

Z hlediska koncepce, má disertační práce 7 popisných kapitol. Již v úvodní kapitole autor uvádí celou řadu citačních zdrojů. Úvod měl být více obecný a měl vytvořit „vstupní bránu“ k řešenému tématu. Tak jak je uveden, je již součástí rešeršní studie. V úvodu práce je použitý zdroj [5] „Telasang, G., Majumdar, D. J., Wasekar, N., Padmanabham, G., Manna, I. Microstructure and Mechanical Properties of Laser Clad and Post-cladding Tempered AISI H13 Tool Steel. Metallurgical and Materials Transactions A. 2015, Vol. 46, 5, pp. 2309–2321.“, v němž

je celá řada dalších velmi cenných informací týkající se souvislosti mezi zbytkovým napětím a výslednými vlastnostmi. Informace, které jsou v tomto zdroji uvedeny, mohly být více využity. Druhou kapitolou začíná oficiální teoretická část disertační práce. Začíná popisem laserů a laserových technologií. V této souvislosti mohla být uvedena také technologie „Laser shock peening“, neboť tato technologie by mohla být využita jak v předpřípravě povrchu před laser cladding popř. i následně po jeho aplikaci. V další části kapitoly 2 je obecný popis ocelí. Tento obecný popis, když už byla tato kapitola zařazena, se měl více věnovat nástrojovým ocelím, jejich specifikaci a zvláštním vlastnostem vyplývající z jejich struktury a chemického složení. V této kapitole mohl autor také více uplatnit vědecký přístup, a to i s využitím celé řady dostupných zdrojů. I s ohledem na další popis měl jednoznačně věnovat pozornost struktuře nástrojových ocelí a především karbidům. V této souvislosti jsem doporučil zdroj „GOLDSCHMIDT H. J. Interstitial Alloys. Springer Science Business Media New York 1967. ISBN: 978-1-4899-5880-8“. Ve vazbě na tepelné zpracování a následné strukturní analýzy by bylo vhodné také větší pozornost věnovat zbytkovému austenitu. Další podkapitoly se věnují popisu reálných struktur, a to i ve vazbě na mřížkové poruchy a souvislosti se zbytkovým napětím, orientaci zrn apod. V této kapitole mohl být více využit vědecký potenciál autora, a to i ve vazbě na jeho významné zkušenosti z jiných průmyslových aplikací, které v průběhu svého doktorského studia řešil. Stále ještě ve druhé kapitole, která je tak velmi široká, se věnuje difrakčním metodám aplikovaných na reálných strukturách. Uvedené informace mají obecný charakter bez vazby na vlastní experimentální program. Tato připomínka se týká i posledních podkapitol druhé kapitoly. Jsou zde teoreticky uvedeny použité analytické metody, ale chybí hlubší provazba na vlastní experimentální program. Z navrhované hlubší vazby by vyplynuly okrajové podmínky jednotlivých analýz, jejich přesnost, ale také možnost získání většího množství informací. Jako příklad lze uvést nanoindentační měření tvrdosti. Jak se v následné praktické části a následné diskusi ukázalo, chyběly zde pro širší interpretace informace o hodnotách modulu pružnosti v tahu (E), které bylo možné stanovit z nanoindentačního měření.

Třetí kapitola popisuje rešeršní výsledky laser cladding oceli AISI H13. Opět z použitých literárních zdrojů mohla být větší výtěžnost informací, které mohly posílit vědeckou úroveň disertační práce, ale také najít větší provázanost s následnou praktickou částí. Bylo by rovněž přínosem, kdyby autor disertační práce více diskutoval předkládané výsledky rešerše a zaujal k nim vlastní postoj.

Čtvrtá kapitola popisuje vlastní cíle práce. Ty budou diskutovány v následné části posudku. Před jejich uvedením, popř. jako úvod dané kapitoly by bylo vhodné shrnout poznatky z literární rešerše a na ně navázat stanovenými cíli. Od kapitoly 5 (str. 67) je vlastní experimentální program, který se nejdříve věnuje jedné vrstvě laser cladding návaru a v kapitole 6 je zahrnut vícevrstvý návar. Zde autor použil termín „multilayer“. Tento termín se v odborných kruzích používá pro specifické tenké vrstvy, v tomto případě může být toto označení zavádějící. Obě praktické kapitoly mají podobnou koncepci skladby jednotlivých podkapitol, které tak přináší dosažené výsledky jednotlivých analýz. V těchto praktických částech disertační práce (především v oblasti vícevrstvých návarů) se projevila absence některých důležitých informací v teoretické části. Konkrétně chybí souvislosti mezi strukturou a zbytkovými napětími a chováním karbidů, včetně hlubšího popisu jejich vlastností a druhů (typy). Kapitola 6 obsahuje veškeré informace týkající se těžiště disertační práce. Na jejím závěru je velmi stručné shrnutí výsledků, nikoliv však poznatků ve vazbě na literární rešerši.

Poslední kapitola je rovněž velmi přínosná, protože shrnuje výsledky a ty dává do kontextu s dalšími možnostmi. Přičemž důraz je kladen na možnost využití výsledků pro numerickou simulaci. Následuje seznam použité literatury. Je uvedeno 97 literárních zdrojů. Tyto zdroje jsou velmi aktuální a týkají se dané problematiky. Jak již bylo uvedeno, některé poznatky mohly být více akcentovány a rovněž se měla rešerše věnovat i strukturnímu stavu nástrojových ocelí a procesům tepelného zpracování ve smyslu struktur a jejich strukturních částí (karbidů) a procesu popouštění.

Metody zpracování

Literární rešerše je koncipována ve smyslu následujícího experimentálního programu. V některých směrech mohl jít autor víc do hloubky, a to jak v popisu laserových technologií (rozložení energie při laser cladding s ohledem na použitou navařovací hlavu – optiku), interakce materiálu s laserem a procesy odehrávající se v materiálu. Je popsán Marangoniho efekt, ale chybí hlubší vazba na konkrétní dosažené rozložení chromu a dalších legujících prvků. Některé popisy jsou naopak příliš podrobné a v kontextu disertační práce je lze vypustit a zaměřit se na hlubší souvislosti. To se týká především popisu jednotlivých analytických metod, které jsou příliš zjednodušené a tím se nedostávají k podstatě problému a hlubší vazbě na následující praktickou část a dosažené výsledky. S ohledem na pracnost experimentu PIN-on-DISC měla být větší pozornost věnována dosaženým výsledkům. Ty sice na první pohled poskytují rozporuplné výstupy. Je to dáno tím, že nejsou podchyceny všechny vstupní a ovlivňující podmínky. Rovněž z provedených nanoindentačních měření bylo možné získat celou řadu dalších poznatků než pouze rozložení nanoindentační tvrdosti HV_{IT} . Pozitivně hodnotím velké množství měření a grafické zdokumentování dosažených výsledků, čímž se zvyšuje přehlednost disertační práce.

Cíle disertační práce

Jsou stanoveny jasně, jsou aktuální a z jejich popisu lze jednoznačně stanovit směr disertační práce. Jejich popisnost dovoluje si udělat nejen přehled o záměru disertační práce, ale také je možná kontrola jejich naplnění. Některé pojmy, např. „real structure“ měly být více popsány v teoretické části. Konkrétně zde chybí hlubší popis karbidických fází a jejich souvislosti k procesům tepelného zpracování (viz předchozí komentáře). Cíle disertační práce měly také více navazovat na provedenou rešerši. Z rešerše měly jednoznačně vyplynout oblasti zájmu, ke kterým by byly tyto cíle vztaheny. Všechny stanovené cíle byly dosaženy.

Výsledky a vědecký přínos práce

Z předchozích komentářů by se mohlo mylně dospět k názoru, že disertační práce nemá požadovaný vědecký potenciál. Naopak, vědecký přínos práce je nepopiratelný. Uvedené komentáře mají nasměrovat autora k hlubším provázkám, protože téma disertační práce se zabývá podstatou aplikačního problému, a proto ještě větší provázanost by dovolila posunout stupeň poznání do oblastí, které praxe využije, ale ve své podstatě tam nikdy ve svých průmyslových a technických možnostech nedosáhne. Již zbytkové napětí je oblastí, které se věnuje velké množství vědeckých publikací, avšak mnohé popisují pouze dopady bez vazby na hlubší souvislosti. Tato disertační práce jde dál. Popisuje nejen zbytkové napětí ve vazbě na technologii laser cladding, ale také uvádí návaznost vlastností kontaktního namáhání (PIN-on-DISC), které vztahuje k materiálovému popisu (struktura, tvrdost, mechanické vlastnosti). Některé literární poznatky, ale i vlastní výsledky z experimentálního programu mohly být více diskutovány, provázány, ale takto komplexně to vyplývá, až když jsou všechny výsledky pohromadě a jsou hledány vzájemné interakce.

Formální úprava disertační práce a její jazyková úroveň

Disertační práce je napsána v anglickém jazyce. Je velmi přehledná a srozumitelná, poskytuje potřebné informace a to jak k rešerši, tak i k experimentu. Některé převzaté snímky byly oproti originálu upraveny. Důvod těchto úprav není zřejmý, ale přesto výsledná úroveň sdělení není snížena. Autor mohl u odkazů na obrázky z předchozích kapitol uvádět i stranu, kde se snímek vyskytuje, popř. mohl snímek vložit do dalšího snímku. Některé snímky mohly být i s ohledem na rozložení textu větší a také by bylo pro čtenáře přínosné, kdyby byl text na stejné straně jako jsou uvedené snímky, což by s ohledem na oboustranný tisk bylo dosažitelné. Celkově po formální stránce hodnotím práci velmi dobře zpracovanou. Její struktura a náplň poskytne velmi cenné studijní podklady nejen pro další studenty, ale i v průmyslové praxi.

Celkové zhodnocení disertační práce

Doktorand Ing. Karel Trojan prokázal nejen na základě hodnocené disertační práce hluboké znalosti v oboru RTG difrakce, čemuž se věnuje ve své profesi, ale i u dalších analytických metod, které jsou v práci uvedeny. Dokázal propojit výsledky literární rešerše s následujícím experimentálním programem a dosažené výsledky vhodně komentuje. Za velmi cenné považuji i to, že uvádí další možnosti využití dosažených poznatků a směřování do oblasti numerických simulací. Hodnocená disertační práce prokázala hluboký vědecko-výzkumný potenciál autora, jeho teoretické i praktické poznatky a také schopnost interpretace dosažených výsledků včetně komentáře směřující k praktickým aplikacím.

Doporučení k obhajobě

Posuzovaná disertační práce autora Ing. Karla Trojana splňuje věcné a formální kritéria pro disertační práci. Autor prokázal dostatečné teoretické a praktické znalosti, které mu umožnily získat cenné výsledky a následně je správně analyzovat a vyhodnotit.

Na základě výše uvedeného posudku **doporučuji**, aby byla tato disertační práce předložena k obhajobě před komisí daného doktorského studijního programu. Po úspěšné obhajobě, aby byl panu Ing. Karlu Trojanovi dle zák. č. 111/1998 Sb. § 47 **udělen vědecko-akademický titul *philosophiae doctor (Ph.D.)***.

Otázky k obhajobě:

- 1) Jaké jsou obecné projevy zbytkových napětí (charakteru tah/tlak) na výsledné vlastnosti (mechanické vlastnosti, korozní chování, fyzikální vlastnosti – např. elektrická vodivost).
- 2) Proč není popouštění vytvořeného vícevrstvého návaru oceli AISI H13 nezbytné? (Otázka je koncipována nejen na dosažené výsledky návaru, ale i na podkladový materiál AISI H11).
- 3) Jaké jsou u vícevrstvého návaru jednotlivé popisované oblasti? (tyto oblasti zakreslete přímo do obr. č. 42 str. 86 – konkrétně oblast s max. HV, vyžíhaná oblast, promísení, TOO, základní materiál) Uveďte strukturní snímky jednotlivých oblastí v takovém rozlišení, aby byly zachyceny charakteristické strukturní stavy.

V Plzni, 31. července 2022

prof. Dr. Ing. Antonín Kříž, IWE