

Doc. Ing. Bohumil Pacal, CSc.
Ústav materiálových věd a inženýrství
Fakulta strojního inženýrství VUT v Brně
Technická 2896/2, 616 69 Brno
Tel.: +420603151583
e-mail: pacal@fme.vutbr.cz

Oponentský posudek doktorské disertační práce

Název práce: **Mini-tixoforming ocelí**
Autor: Ing. Filip Vančura
Vedoucí práce: Prof. Dr. Ing. Bohuslav Mašek
Školící pracoviště: Katedra materiálu a strojírenské technologie, Fakulta strojní, ZČU Plzeň
Studijní obor: Materiálové inženýrství a strojírenská technologie

Předložená dizertační práce je orientována na problematiku inovativního přístupu k tváření kovů po jejich částečném natavení, tj. v semi-solid stavu. Autor se zabývá technologicky náročnou metodou mini-tixoformingu, která je zaměřena na termomechanické zpracování přesných výrobků velmi malých rozměrů a komplikovaných tvarů bez nutnosti následného tepelného zpracování. V současné době se tato technologie uplatňuje zejména u některých slitin neželezných kovů. Výzkum a vývoj této zcela nekonvenční technologie, směřovaný do oblasti obtížně zpracovatelných ocelí, je proto velmi aktuální.

Hlavní cíl práce sleduje zpracování nástrojové oceli X210Cr12 do semi-solid stavu a objasnění souvislostí mezi výchozí mikrostrukturou připravenou různými technikami na výslednou strukturu a vlastnosti oceli po semi-solid zpracování při využití extrémně vysokých rychlostí ohřevu a ochlazování. Za základní strukturní parametr byla vzata velikost zrna. Na přípravu vzorků metodou mini-tixoformingu a jejich vyhodnocování bylo použito velké množství experimentálních technik. Zároveň je možno konstatovat, že řešením daného téma dizertační práce byly získány zcela originální výsledky.

Práce je zpracována na 115 stranách, obsahuje 110 obrázků či grafů a 13 tabulek. Je rozdělena do jedenácti kapitol, přičemž první kapitolu představuje úvod a v posledních dvou kapitolách jsou uvedeny seznamy použité literatury i vlastních publikací. Teoretická část obsahuje potřebné informace z literárních zdrojů, které se týkají popisu tixotropního stavu látek a jeho modelování. Dále jsou uváděny možnosti ohřevu materiálu do semi-solid stavu a možné technologie jeho zpracování po částečném natavení. Při řešení zadaného téma autor použil 50 literárních pramenů, což vzhledem na ojedinelou metodu zpracování materiálu aplikovanou u ocelí lze považovat za dostatečné. Rovněž 28 vlastních publikací z oboru tváření a zejména termomechanického zpracování kovů v posledních šesti letech, ve kterých vystupuje jako hlavní autor nebo spoluautor dokladuje, že se dané problematice intenzivně věnuje.

Experimentální část práce je rozdělena na dvě části. V první se autor věnoval několika možnostem získání výchozího stavu materiálu o rozdílných strukturních parametrech se zaměřením zejména na velikost zrna. Základem pro experimenty byl u oceli X210Cr12 stav žíhaný naměkko, který byl modifikován vysokoteplotním žíháním s použitím rozdílných teplot a výdrží a teplotním cyklováním přes teploty A_{c1} s využitím rychlého ohřevu a ochlazování. Dále byly vzorky zpracovány metodami intenzivní plastické deformace (SPD). Jednalo se o torzní tváření a metodu bezkontaktního protlačování ECAP. Ke splnění cílů práce a vypracování za-

daného téma použil autor unikátní experimentální zařízení i postupy měření, které vyžadovaly zvládnutí jak moderního přístrojového vybavení, tak zpracování a vyhodnocení naměřených údajů.

Ve druhé části experimentů byl prakticky u všech takto získaných struktur proveden mini-tixofforming na termomechanickém simulátoru s nástroji upravenými pro zpracování v semi-solid stavu. Vzorky s tvarem upraveným pro vysokofrekvenční odporově-indukční ohřev byly nejprve nataveny bez formy i s využitím forem s přímou drážkou, které umožňují příčné stranové vytlačování. Zkoušky probíhaly bez i s aplikací rychlé deformace a s různými rychlostmi ohřevu a ochlazování vzorků. Při hodnocení získaných strukturních stavu byla vždy hodnocena velikost zrna metodou difrakce zpětně odražených elektronů (EBSD) na řádkovacím elektronovém mikroskopu a změřena tvrdost vzorků. Dosažené výsledky byly porovnávány s výchozím stavem, tj. žíhaným naměkko po provedeném tixofformingu.

Zpracování naměřených výsledků lze hodnotit z hlediska stylistické úrovně jako průměrné. Práce se sice vyznačuje velkým množstvím provedených podrobných strukturních analýz doplněných mechanickými vlastnostmi, avšak při jejich zpracování lze postrádat systematickosti a přehlednosti. Autor se v textové úpravě nevyhnul překlepům, nesprávným technickým výrazům i gramatickým chybám. Rovněž použití velkého množství zkratk, z nichž některé nejsou uvedeny v příloženém seznamu, zbytečně omezuje čtivost textu. Z hlediska grafické úpravy je práce vhodně doplněná schémata a obrázky, ale úpravě obrázků měla být věnována větší pečlivost. U některých z publikovaných obrázků nejsou velikosti i popisy zcela jednotné a některé struktury dostatečně průkazné a čitelné (obr. 57, 61, 66 a 78), případně jsou prezentovány zcela obrácené (obr. 38). V diskusi výsledků však zcela chybí jakákoliv citace či porovnání se zahraničními literárními prameny, přičemž v úvodu práce autor uvádí, že zpracování velmi malých dílů v tixotropním stavu již bylo ve světové literatuře i u ocelí v jistém malém rozsahu popisováno.

K teoretické části práce mám tyto připomínky resp. otázky:

- str. 10 obr. 1 - že dochází k tixotropnímu chování u plastických systémů příp. gelů, tj. k poklesu dynamické viskozity v důsledku působení smykového napětí a zpětnému nárůstu v klidovém režimu, bylo dostatečně objasněno. *Vysvětlete však, proč klesá tato hodnota s časem při smykovém namáhání slitin kovů v semi-solid stavu, když mají relativně vysoký podíl tuhé krystalické fáze!*

- *Popište, jak ovlivňuje velikost zrna a jejich tvarový faktor u výchozí struktury materiálu jeho vhodnost pro tixotropní tváření!*

- na str. 15 odst. 4 uvádíte, cituji: Dalším mikrostrukturám parametrem je tekutá fáze zachycená uvnitř zrna. *Vysvětlete mechanismus vzniku částečně natavené fáze v materiálu po překročení teploty solidu při běžných a vysokých rychlostech ohřevu a jak vzniká tekutá fáze uvnitř zrn!*

- str. 26 odst. 3 uvádíte, cituji: určitou nevýhodou indukčního ohřevu vzorku je tzv. skin efekt. Jedná se o nepříznivý jev při ohřevu, kdy proudová hustota ve vzorku protékaného střídavým elektrickým proudem je největší u povrchu, což má za následek výrazný příčný teplotní gradient. *Ovlivňuje tento efekt pouze použitá frekvence proudu?*

K druhé experimentální části práce obsahující velké množství experimentálně naměřených dat, která jsou zpracována spíše chronologicky než metodicky, mám následující připomínky, poznámky a dotazy do diskuse:

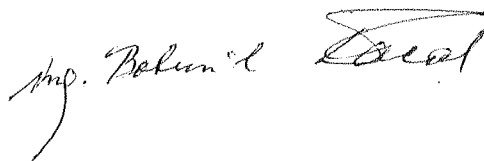
- str. 34 odst. 7 - při vyhodnocení struktury výchozího stavu uvádíte, že cituji: „ve feritické matici je uložen cementit“. *Je tomu skutečně tak a jaký typ karbidu to je? Jakého typu jsou eutektické chromové karbidy?* V práci je uveden typ M_7C_3 , ale v autoreferátu $M_{23}C_7$ (správně $M_{23}C_6$)

- str. 40 odst. 4 v návrhu teploty dlouhodobého vysokoteplotní žihání vzorku uvádíte teplotu 1050°C , ale při zhodnocení výsledků na str. 55 uvádíte teplotu 1100°C. *Jaká byla teplota ve skutečnosti?*
- str. 42 odst. 2 při vyhodnocení struktury vzorků po teplotním cyklování byly pozorovány v eutektických karbidech dvojčata. *Vysvětlete, jak tento jev souvisí s tepelným cyklováním! Jedná se skutečně o proces vzniku žihacích dvojčat v karbidech nebo je jejich původ již při výchozím zpracování polotovaru tvářením?*
- str. 55 tab. 2 V tabulce uvádíte výsledky velikosti zrna a naměřené hodnoty tvrdostí. U vzorků po teplotním cyklování byla naměřena tvrdost 650 HV30 při průměrné velikosti zrna 1,8 μ m a u torzního tvářením jen 495HV30 při více jak trojnásobně menší velikosti zrna 0,5 μ m. *Vysvětlete příčiny rozdílů tvrdosti u takto zpracovaných vzorků!*
- *Uveďte, kterým postupem se nakonec podařilo získat kvalitní „produkt“ příčným stranovým vytlačováním materiálu do formy a jaká byla jeho struktura?*
- u všech realizovaných experimentů dochází po semi-solid zpracování vzorků ke vzniku přetaveného eutektika. *Vyslovte názor, jaké bude mít tato forma eutektika vliv na výsledné mechanické vlastnosti (mez pevnosti v ohybu, houževnatost) a odolnost proti opotřebení u sledované nástrojové oceli!*
- *zhodnoťte, v čem vidíte hlavní vědecký přínos vaší práce.*

Závěrečné zhodnocení:

Přes uvedené připomínky předkládaná disertační práce svědčí o zvládnutí náročných experimentů i přináší nové poznatky v oboru materiálového inženýrství a strojírenské technologie. Cíle zadané práce byly splněny a autor prokázal, že má předpoklady pro samostatnou vědeckou práci. Na základě dosažených výsledků doporučuji doktorskou práci k obhajobě a v případě jejího úspěšného obhájení udělit autorovi akademický titul „Philosophiae doctor“.

V Brně 27. 6. 2017



POSUDEK DISERTAČNÍ PRÁCE

Doktorand: **Ing. Filip Vančura**

Název práce: **Mini-tixoforming ocelí**

Předložená disertační práce je zaměřena do oblasti zpracování kovů v semi-solid stavu, to znamená, zabývá se problematikou tixoformingu. Tato technologie tváření představuje perspektivní směr ve zpracování kovů a jejich slitin. Otevírá nové možnosti zpracování obtížně tvářitelných materiálů, navíc lze tímto způsobem dosáhnout tvarově komplikovaných součástí s vysokou přesností v jednom nebo několika málo tvářecích krocích. Je ovšem skutečností, že s ohledem na technologickou náročnost celého procesu, se tento způsob zpracování pohybuje zatím (v převážné míře) ve fázi vývoje.

Mezi jednu z inovativních metod v oblasti semi-solid zpracování patří technologie mini-tixoformingu. Je zaměřena na prvky velmi malých rozměrů, kdy je možné (oproti „klasickým“ postupům tixoformingu) dosáhnout mimořádně strmých gradientů ohřevu i extrémně vysoké rychlosti solidifikace a chlazení. Tyto podmínky pak zásadním způsobem ovlivňují vývoj vznikajících struktur a mechanických vlastností.

Právě problematika mini-tixoformingu se zaměřením na zpracování ocelí je náplní experimentální části diplomové práce. Pro vlastní experiment byla zvolena nástrojová ocel X210Cr12 s tím, že chemické složení tohoto materiálu zaručuje široký interval mezi solidem a liquidem. V průběhu experimentu byly připraveny různé výchozí stavy mikrostruktury pro následné semi-solid zpracování několika způsoby – vysokoteplotním žiháním ke zhrubnutí zrna, teplotním cyklováním, torzním tvářením, ECAP metodou. U všech uvedených způsobů byla po jejich provedení zjišťována velikost zrna a tvrdost.

Vlastní semi-solid zpracování proběhlo na zařízení (TMS), které umožňuje zpracování vzorků různými způsoby. Při vlastním tváření byly měněny základní parametry, tj. způsob ohřevu a jeho rychlost, dráha a rychlost deformačního členu a způsob ochlazování. Po tomto zpracování byla opět u vzorků měřena tvrdost a hodnocena mikrostruktura. Následně byl zjišťován vliv struktury výchozích polotovarů (tj. různé způsoby výchozího zpracování) na strukturu (velikost zrna, rozdílnost uspořádání strukturních složek) a tvrdost materiálu po provedeném tváření. Vzhledem k tomu, že byly připraveny různé stavy mikrostruktury pro semi-solid zpracování a samotné zpracování probíhalo v různých režimech, je následné vyhodnocení experimentu značně rozsáhlé. V diskusi a závěru je pak provedeno shrnutí získaných poznatků, ve kterém je konstatováno, že modifikace struktury výchozího polotovaru může významným způsobem ovlivnit velikost finálního zrna a tím i mechanické

vlastnosti. Navíc, při zkouškách teplotní stability austenitických struktur zkoumané oceli byla prokázána značná míra této stability.

Splnění cílů disertační práce:

Cíle práce jsou uvedeny nevhodným (vágním) způsobem. V kap. 4 „Motivace a cíle práce“ (str. 31 a 32) je v podstatě uvedena náplň experimentální části. Hodnotit proto splnění vyčtených cílů práce je velmi problematické.

Poznámka: Pokud je možno vzít v úvahu text Anotace, kde je na str. 3 mimo jiné uvedeno: *„Hlavním cílem této práce ve zmíněné oblasti bylo nalezení souvislosti mezi mikrostrukturou výchozího polotovaru a mikrostrukturou po zpracování vzorku nad křivkou solidu zvolené oceli“*, pak lze připustit, že práce dostala svému určení.

Zhodnocení významu pro obor a dosažené výsledky:

Jak již bylo v úvodu naznačeno, mini-tixoforming představuje v oblasti tváření perspektivní technologii. Převážná část doposud publikovaných výsledků zasahuje do oblasti zpracování nízkotavitelných slitin na bázi Al a Mg. Hlavní devizou předložené práce je skutečnost, že přináší řadu nových poznatků, které se týkají tváření ocelí, kdy vlastní proces probíhá za vysokých teplot. Za nové konkrétní výsledky je možno považovat nalezení vhodných parametrů pro semi-solid zpracování u sledované oceli. Rovněž byl prokázán vliv výchozí struktury na strukturu finální. Dalším důležitým poznatkem je prokázání vlivu již zmíněné výchozí struktury na zabíhavost materiálu do dutiny formy. Navíc, v rámci disertační práce, došlo k využití několika doposud ojedinělých technik. I tato skutečnost přispívá k rozšíření poznatků při nekonvenčním zpracování ocelí.

Vhodnost použitých metod řešení:

Při realizaci experimentálního programu a jeho vyhodnocení byla využita řada moderních metod. V případě modifikace výchozí struktury se jednalo o teplotní cyklování, metody SPD (torzní tváření, metoda ECAP) a metody HPT. Vlastní tváření probíhalo na moderním termomechanickém simulátoru s nástroji speciálně vyvinutými pro semi-solid zpracování. Pro sledování přechodu do dvoufázové oblasti byl použit vysokoteplotní mikroskop. Vyhodnocení zrna se uskutečnilo pomocí elektronové mikroskopie (ŘEM, TEM). Pro stanovení lokálního chemického složení byl využit EDX detektor a RTG difrakční analýza umožnila stanovení podílu jednotlivých fází.

V souhrnu je tedy možno konstatovat, že pro náročný experiment byly použity moderní metody s vysokou rozlišovací schopností.

Formální úroveň práce:

Formální úroveň práce je na velmi dobré úrovni. Nesporným kladem je celkem rozsáhlá metalografická část, která obsahuje kvalitní snímky mikrostruktur. Text má logickou stavbu. Navíc je doplněn řadou schémat, použitých technik a zařízení, která přispívají k jeho srozumitelnosti. Určitým nedostatkem je nesprávně vytvořené záhlaví na stránkách práce (nejedná se o „ písemnou práci ke státní doktorské zkoušce“).

Publikační činnost:

Publikační činnost doktoranda je na odpovídající úrovni. Doložené publikace z období 2011 – 2016 naznačují, že doktorand se zvolené problematice dlouhodobě věnuje.

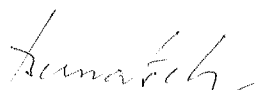
Připomínky a doporučení:

- u jedné série zkušebních vzorků byly k aktivní části tělesa (zkoumaný střed) přivařeny kuželové konce pro uchycení na TMS. Jakým způsobem bylo svařování provedeno a byla zjišťovaná šířka TOO?
- při vlastní obhajobě by bylo vhodné:
 - a) blíže představit metodu HPT, která byla jako jedna z variant využita pro modifikaci struktury výchozího materiálu
 - b) přiblížit důvody, které vedly k provedení semi-solid zpracování oceli bez využití formy

Závěr:

Disertační práci doporučuji k obhajobě.

V Plzni, 28.8.2017


doc. Ing. Vladimír Bernášek, CSc.