

## Oponentní posudek

disertační práce Ing. Daniely Hauserové

„Zrychlené mikrostrukturní děje při nových procesech tepelného a termodynamického zpracování“

(školitel Dr. Ing. Zbyšek Nový)

### a) Zhodnocení významu pro obor

Práce uvádí výsledky studia mikrostrukturních procesů při tepelném a termomechanickém zpracování dvou komerčních ocelí a současně se zaměřuje na vypracování technologického postupu použitelného ve výrobě, které zajistí vyšší kvalitu finálního výrobku při snížení finančních nákladů. Zabývá se novou technologií sferoidizace karbidů nazývanou v zahraniční literatuře Accelerated Spheroidisation and Refinement (ASR), která by měla nahradit dlouhodobé žíhání feriticko-perlitických ocelí používaných pro výrobu konstrukčních součástí následované zušlechtním finálního výrobku. Výsledky práce jsou významné jak z teoretického hlediska, tak z hlediska možných průmyslových aplikací.

### b) Vyjádření k postupu řešení problému a použitým metodám

Cílem práce bylo prozkoumání možnosti nahradit energeticky a časově náročné tepelné zpracování feritických ocelí, které zlepšuje obrobiteľnosť a po finálním zušlechtním výrobku zaručuje dostatečnou pevnost a houževnatost. K dosažení cíle byl zvolen bohatý a důkladně propracovaný experimentální program při využití rozsáhlého experimentálního vybavení, kterým disponuje firma COMTES FHT. V rámci tepelně mechanického zpracování bylo realizováno kování na hydraulickém lisu a válcování na laboratorní válcovací stolici při využití numerických simulací tváření. Pro tepelné zpracování byl zvolen indukční ohřev v kalícím dilatometru nebo ve středofrekvenčním měniči kmitočtu. Pro měření teplot fázových přechodů, které jsou potřebné pro volbu správného režimu tepelného i tepelně mechanického zpracování, byla použita dilatometrie, pro mikrostrukturní studium světelná a řádkovací elektronová mikroskopie (ŘEM) včetně difrakce odražených elektronů (EBSD). Kvantitativní hodnocení mikrostruktury bylo provedeno pomocí programu obrazové analýzy. Pro hodnocení stupně fragmentace a sferoidizace karbidů byla použita originální a relativně jednoduchá metoda extrakce karbidů, která umožnila posouzení prostorového tvaru částic a podstatně věrohodnější hodnocení postupu sferoidizace, než je možné z rovinného řezu metalografického výbrusu. Pomocí mechanických zkoušek (zkoušky tahem, zkoušky KCV a měření tvrdosti) byly hodnoceny vlastnosti uvedených ocelí ve stavu po sferoidizaci karbidů rozptýlených ve feritické matici. V tomto stavu byly provedeny též zkoušky obrobiteľnosti a po finálním zušlechtním byly provedeny též zkouška odolnosti vůči opotřebení a zkouška životnosti ložiskových kroužků.

Těžištěm práce by podle názvu disertační práce mělo být mikrostrukturní studium. K přípravě vhodného experimentálního materiálu bylo nezbytné vyzkoušet různé postupy zpracování ocelí a pro zjištění souvislostí mikrostruktury s výslednými vlastnostmi bylo potřeba provést

mechanické zkoušky a s ohledem na praktické využití výsledků disertační práce i technologické zkoušky. Postup řešení i experimentální metody byly voleny účelně. Velký důraz byl kladem na použitelnost vypracovaných postupů v praxi, což je velkým přínosem předložené práce.

c) Stanovisko k výsledkům a konkrétní přínos disertantky

Objem získaných experimentálních výsledků je velký a bezpochyby představuje práci celého týmu pracovníků. V disertační práci postrádám vymezení vlastní práce disertantky. Při obhajobě bude nutné uvést, které experimenty disertantka samostatně provedla a vyhodnotila. Celkové zpracování výsledků je velmi pěkně provedeno. Velké množství provedených režimů zpracování je přehledně popsáno, shrnuto v tabulkách a grafech. K dobré orientaci ve složitém experimentu přispívá výstižné a logické značení vzorků (viz. např. str. 76).

Disertantka se dobře zorientovala ve složitém problematice. Evidentně se soustředila na vypracování technologického postupu využitelného v praxi a neměla tak dostatečný prostor pro teoretické zpracování výsledků. Nicméně se snažila pozorované procesy přiřadit k některému z modelů sferoidizace uvedených v rešeršní části disertační práce. Tím potvrdila platnost uvedených modelů v praxi a přispěla k prohloubení teoretických poznatků v dané problematice.

d) Vyjádření ke zpracování a formální úpravě disertační práce

Předložená práce je po formální stránce, jazykové i odborné, velmi zdařilá. Je členěna na teoretickou část v rozsahu 33 stran, experimentální část o rozsahu 77 stran, diskusi a závěr. Diskuse představuje shrnutí provedených prací s rozbohem vlivu deformace na sferoidizaci karbidů při TMZ a vlivu cyklických změn teploty ve vhodném teplotním intervalu při TZ. Závěr je stručný a výstižný. Pro lepší orientaci čtenáře by bylo vhodné uvést přehled použitých zkratk. Všechny uvedené snímky mikrostruktur jsou velmi kvalitní. Vysokou vypovídající hodnotu mají zejména snímky extrahovaných karbidických částic (obr. 151 až 156).

K práci mám několik drobných připomínek:

Str. 26, ř. 12: *Citace...struktura vzorku obsahuje několik cementitických nodulí...není uvedeno v jakém objemu vzorku...*, ř. 19: *...velikost částic není velká...měla by být přesněji vymezena velikost částic...*, předposlední odstavec: není uveden význam teplot  $A_{rcm}$  a  $A_{cm}$ . (není to tak běžné značení jako v např. u teploty  $A_{c1}$ ).

Str. 27, 7. ř. zdola: *...Hranice zrn můžou nabídnout nukleační pozice a jeho energie je větší než uvnitř zrna...*To je špatná formulace. Co tím disertantka míní?

Str. 28, ř. 4: *...cementitických lamel...překlep (několik dalších evidentních překlepů je opraveno přímo v práci).*

Str. 30, poslední odstavec: *...vazebná energie mezi atomy uhlíku a hranovými dislokacemi ve feritu je větší než mezi atomy uhlíku a železa v cementitu. Ve výsledku se cementitické částice rozpouštějí a uhlíkové atomy difundují dislokačními kanály ...*Termín vazebná energie není vhodný, neboť mezi atomy uhlíku a dislokacemi není pevná vazba a dislokace se podél jádra dislokací mohou snáze pohybovat, než neporušenou mřížkou.

Str. 51: *...byly viditelné skluzové pásy téměř ve všech perlitických koloniích...*Na uvedených snímcích naleptaných metalografických výbrusů pořízených v ŘEM nebyly viditelné skluzové

pásy. Na intenzivní plastickou deformaci koncentrovanou do deformačních pásů lze usuzovat pouze z pokročilého stadia fragmentace a sferoidizace cementitu.

Str. 56 a 57, obr. 75 a 77: na obrázcích jsou zobrazeny extrahované částice karbidů po hloubkovém leptání.

Str. 76, ř. 11: *...měněnými parametry...lépe proměnnými*, dále odstavec 5 popisuje totéž co odstavec 3.

Str. 80: ř. 11: *...míra sferoidizovaných karbidů se zvyšovala...jaká míra, o jakou veličinu se jedná?*

Str. 112, konec 2. odstavce: opakovaná výhrada k pozorování skluzových pásů a následně nepřesné tvrzení na konci stránky, týkající se výskytu lamelárního perlitu.

Str. 116, ř. 23: Správně *...obsah zbytkového austenitu...způsobený rozpuštěním*.

Doplňující otázky:

- 1) Jak byly připraveny vzorky s izolátem karbidických částic pro pozorování v ŘEM?
- 2) Objasněte tvrzení na straně 27 výše uvedené v připomínkách *...Hranice zrn můžou nabídnout nukleační pozice a jeho energie je větší než uvnitř zrna...Proč k perlitické transformaci dojde přednostně na hranicích zrn?*
- 3) Objasněte princip rozdělené eutektoidní transformace.
- 4) Jakým způsobem lze zviditelnit skluzové a deformační pásy v oceli?

e) Vyjádření k publikacím disertantky

V disertační práci je uvedeno 73 odkazů, z toho 4 základní učebnice, 49 anglicky a jeden česky psaný odborný článek, 4 internetové odkazy, 4 patenty a 11 článků publikovaných výzkumným kolektivem pracoviště disertantky. Disertantka je uvedena jako spoluautorka dvou patentů, 8 článků v impaktovaných časopisech, 7 článků v neimpaktovaných odborných časopisech a 16 článků ve sbornících konferencí. Tento seznam vypovídá o bohaté publikační činnosti disertantky i o vysoké odborné úrovni pracoviště, kde byly experimenty prováděny. Snad jen odborná rešerše mohla být rozsáhlejší. Nicméně v práci uvedené teoretické základy dané problematiky jsou postačující.

f) Doporučení k obhajobě

Předložené disertační práce je velmi kvalitní, mám v podstatě jedinou významnou výhradu týkající se podílu disertantky na provedených pracích. Nepochybuji o tom, že se významně podílela na řešení dané problematiky, avšak její podíl by měl být v práci jasně vymezen.

Disertační práce odpovídá požadavkům kladeným na disertační práce podle zákona č. 111/1998 Sb. §47 a doporučuji, aby byl autorce

**Ing. Daniele Hauserové**

udělen akademický titul „doktor“.

V Plzni 30. 10. 2014

doc. RNDr. Dagmar Jandová, Ph.D.



## Oponentský posudek

**Disertační práce:** Ing. Daniela Hauserová  
**Zrychlené mikrostrukturní děle při nových procesech tepelného a termomechanického zpracování**

**Studijní obor:** **Materiálové inženýrství a strojírenská metalurgie**

**Vypracoval :** **Doc. Ing. Jiří Janovec, CSc**  
**Ústav materiálového inženýrství**  
**Strojní fakulty ČVUT v Praze**

Cílem předkládané práce je řešení materiálové problematiky dosažení jemnozrnné struktury složené z feritické matrice a sferoidizovaných karbidů novými technologickými postupy a tím dosáhnou výrazně kratšího času než při způsobech klasického tepelného zpracování.

Tento cíl disertační práce však není pregnantně v práci uveden, je součástí kap. 1 – Úvod.

Vlastní cíl práce představuje dosažení transformace původní feriticko – perlitické struktury s lamelárním perlitem na výslednou mikrostrukturu se sferoidizovanými karbidy rovnoměrně distribuovanými ve feritické matici a to pro dvě klasické oceli, konstrukční nelegovanou ocel C45 a ložiskovou ocel 100CrMnSi6-4. Zde bych chtěl připomenout že autorkou použitý termín “středně uhlíková konstrukční ocel C45“ jež není dle terminologie EN 10020 správný.

Jde o stanovení optimalizovaných parametrů postupů tepelného a termomechanického zpracování, když jejich zkrácením dochází k ušetření nákladů při vytvoření cílené kombinace pevnostních a houževnatostních vlastností uvedených ocelí. Uvedený technologický proces byl ve firmě COMTES FHT a.s. patentován pod názvem ASR (Accelerated Sferoidisation and Refinement).

Je zřejmé, že vzhledem k 2 alternativám experimentálně zkoušených ocelí není možné očekávat a navíc definovat jednotný universální přístup řešení sferoidizace a zjemňování struktury všech feriticko karbidických ocelí. Proto disertační práci je nutno posuzovat jako příspěvek k řešení akcelerace strukturálních stavů, kdy ARS slouží jako výhodný nástroj vytvoření jemnějších karbidů a menší velikosti původního austenitického zrna pro následné kalení a popouštění. Tím dochází k jemnější popuštěné struktuře, vykazující nižší opotřebení a zvyšující životnost zkoušené ložiskové oceli, která vzrostla cca 4 x.

Disertační práce je napsána ve standardním rozsahu, zahrnujícím 117 textových, obrázkových a tabulkových stran. Následný přehled použité literatury uvádí rozsáhlý soubor 73 titulů, z nichž 13 pochází od autorů z COMTES FHT a.s. Hodnotná a rozsáhlá je vlastní publikační činnost s podílem na 40 titulech, rozdělená na patenty, články v impaktovaných časopisech, ostatní články a převážně příspěvky na mezinárodních konferencích. To dokazuje praktickou použitelnost řešeného úkolu pro potřeby technické praxe. Impaktační faktory nejsou zřejmé a některé nepřesnosti v seznamu publikací (např. shoda a neshoda publikací č. 3 a 12) ukazují na nižší kontrolu kapitoly č. 9.

V teoretické části disertační práce v kapitolách 2 až 4 jsou rozsáhle prezentovány mechanismy sferoidizace cementitu, difuze a kalení s popuštěním.

V experimentální části (kap. 5) jsou shrnuty mnohačetné zkoušky a jejich výsledky. Jde o vhodný soubor výsledků, získaných jak termomechanickým zpracováním na hydraulickém kovacím lisu a na laboratorní válcovací stolici nebo tepelným zpracováním v kalícím dilatometru a v zařízení se středofrekvenčním měničem kmitočtu. Nikoliv tedy přímo ve středofrekvenčním měniči kmitočtu, jak je v disertační práci opakovaně uváděno.

Metalograficky velmi kvalitně a s korektní rozlišitelností je v této experimentální části dokumentovaný značný počet mikrostrukturálních obrázků ze skenovacího elektronového mikroskopu dokumentující postup sferoidizace.

Použité zkoušky odolnosti oproti opotřebení metodou pin on disc a porovnání odolnosti povrchů proti kontaktní únavě na zařízení AXMAT II se ukázalo jako vhodný nástroj pro kvantifikaci kvality ložiskové oceli.

Diskuze výsledků, prezentovaná v kap. 6 hodnotí faktory termomechanického a tepelného zpracování na sferoidizaci karbidu ve vztahu ke klastickému žhání na měkko. V práci jsou pečlivě použity kvantitativní ukazatele stupně sferoidizace karbidů a diskutován vliv válcovitosti a diskovitosti cementitických částic. Vlastní identifikace karbidů s ohledem na Cr a Mn však chybí.

V závěrečné kapitole č. 7 se bilancují výsledky disertační práce s konstatováním, že zvolené postupy vedli ke sferoidizaci karbidů řádově v jednotkách minut. Při tepelném zpracování nejúčinnější pro zrychlenou sferoidizaci karbidů je opakované cyklování nad teplotou  $A_{c1}$ . Při termomechanickém zpracování s rostoucí intenzitou deformací a vložením deformace do pokročilejšího stáda perlitické transformace podíl sferoidizovaných karbidů roste.

Oponent při studiu této disertační práce konstatoval vysokou kvalitu grafického provedení. Také textová část disertační práce zpracována velmi slušnou češtinou bez zřejmých překlepů. Následné připomínky, vedle již uvedených, uvádím jen ve snaze pro bližší osvětlení následujících nejasností či jako podnět k případné diskuzi:

- a) Jaký byl důvod používání termínu červovitý karbid
- b) Není důsledně uplatňováno vzhledem ke sledovaným oceli používání termínu karbid a cementit
- c) V obr. 1 na str. 8 u c) jde o polonekonečné vlákno
- d) Proč byla použita pro zkoušku opotřebení jiná tavba oceli (tab. 22) než pro termomechanické zpracování na válcovací stolici (tab. 5).

Ze souboru prezentovaných poznatků, které jsou přínosné pro studijní obor Materiálové inženýrství a strojírenská metalurgie vyplývá, že :

- Doktorandka svou disertační prací prokázala původní a zásadní přínos oboru
- Použité metody řešení prokázaly vhodnost experimentálního postupu.
- Doktorandka splnila stanovený cíl
- Problematika je v posledních letech je vysoce aktuální a celosvětově zpracovávána
- Praktický přínos disertační práce je značný vzhledem k úspoře nákladů na zpracování a zvyšování životnosti součástí

- Poznatky disertační práce jsou beze zbytku aplikovatelné pro oblast nových technologických postupů zpracování ocelí
- Doktorandka prokázala odpovídající znalosti v daném oboru
- Formální úroveň práce se mi jeví velmi dobrá, publikační činnost odpovídá požadavkům na doktorandy

**Závěrečné stanovisko :**

**Předkládaná disertační práce obsahuje původní a uveřejněné výsledky. Splněné konkrétní cíle práce jsou vysoce aktuální a mají zásadní význam pro ekonomiku výrobních procesů a zvyšování životnosti výrobků. Práce odpovídá trendům řešené problematiky především na zahraničních vědecko-výzkumných pracovištích.**

**Na základě uvedených skutečností konstatuji, že práce splňuje požadavky kladené na doktorské disertační práce dané vysokoškolským zákonem č. 111/98 Sb.**

**Protože provedení a výsledky práce splňují potřebné náležitosti, doporučuji, aby za předpokladu úspěšné obhajoby této disertační práce byl**

**Ing. Daniele Hauserové udělen titul Ph.D.**

**v oboru Materiálové inženýrství a strojírenská metalurgie.**

**Praha 21. 10. 2014**

