

Oponentní posudek
na disertační práci Ing. Josefa Káni
na téma

„Nekonvenční metody termomechanického zpracování materiálů“

Předložená disertační práce je členěna do sedmi kapitol: 1. Úvod, 2. Cíle disertační práce, 3. Aktuální stav řešené problematiky, 4. Řízení procesu tepelného zpracování, 5. Experimentální část, 6. Diskuse výsledků a 7. Závěr. Práce je doplněna celkem devadesáti obrázky a diagramy, devíti tabulkami, seznamy citované literatury (88), seznamem citovaných prací, kde je disertant spoluautorem a přílohou příkladů dalších experimentálních aktivit, při nichž bylo využito v rámci disertace vyvinutého experimentálního zařízení.

Samotné téma práce je vysoce aktuální, protože řeší problematiku vývoje vysoko-pevných AHSS ocelí (Advanced High Strength Steels) pro použití zejména v automobilovém průmyslu s cílem zvýšení mechanických vlastností vedoucí ke zvýšení pasivní bezpečnosti, snížení hmotnosti a tím pádem i s dopadem do ekologické oblasti díky snížení spotřeby paliv. Předmětem práce je zkombinování technologie tváření za tepla („Press Hardening“, PH) a kalení a přerozdělení („Quenching and Partitioning“, QP) do jednoho technologického celku s cílem dosáhnout vysoké pevnosti při dosažení dobrých plastických vlastností, tažnosti, resp. houževnatosti.

Formulace cílů práce v kap.2 je široká a spíše se jedná o úvahy patřící do předchozí kap.1 nebo kap.3. Zásadní cíle práce jsou nicméně v kap.2 uvedeny, a to:

- Navrhnout a testovat nové materiály vhodné pro zpracování kombinací metod PH a QP.
- Provést soubor experimentů s různým nastavením parametrů procesu QP.
- Zajistit opakovatelnost zvolených režimů TZ .
- Vyvinout a odladit zkušební zařízení pro TMZ.
- Věnovat pozornost dílčím krokům experimentálního postupu, které mohou ovlivnit závěry z výsledků provedených zkoušek.
- Porovnat výsledné mechanické vlastnosti, analyzovat mikrostrukturu a určit podíl zbytkového austenitu pomocí XRD.

Postup řešení vychází z dobře zpracované rešeršní části v kapitole 3. Stav řešené problematiky a 4. Řízení procesu tepelného zpracování. V této kapitole autor popisuje existující možnosti řízení procesu tepelného zpracování včetně výhod a nevýhod (v době vzniku této práce) dostupných systémů pro termomechanické zpracování.

Vlastní experimentální část, která tvoří jádro disertační práce, je rozdělena na tři části. V první části 5. kapitoly se autor věnuje výběru experimentálního materiálu

včetně technologie výroby polotovarů a výroby zkušebních vzorků. Ve druhé části této kapitoly se autor zabývá vývojem nové verze potřebného experimentálního zařízení, zejména systému ohřevu a chlazení vzorků, které bylo nutno vyvinout, aby splňovalo náročné požadavky na řízení celého procesu tepelného zpracování. Vysvětlení, proč byl pro účely této disertační práce použit „rychlý“ elektrohydraulický stroj MTS, když nebyly vzorky zatěžovány, aby mohly volně dilatovat, se nachází až v příloze A „Ukázky dalších experimentů“.

Ve třetí části 5. kapitoly potom autor uvádí výsledky realizovaného tepelného zpracování pro tři zvolené varianty ocelí získané úpravou chemického složení odvozeného od borové oceli 22MnB5 s vědomím vlivu jednotlivých prvků. Podrobně popisuje režimy tepelného zpracování tří variant zvolených ocelí a výsledky provedených zkoušek, včetně výsledků mechanických a metalografických zkoušek včetně aplikované rentgenové difrakce.

K diskusi dosažených výsledků:

Porovnání hodnot meze pevnosti a tažnosti experimentálních taveb a ocele 22MnB5 prokázalo, že všechny tři nově navržené experimentální materiály vykazují („výrazně“) lepší mechanické vlastnosti. Z výsledků disertační práce vyplynula jako nejlepší varianta ocel označená jako HS2 a režimy QP240, PT270 s dobou přerozdělení 300 a 600 sec., u které byly aplikovaným tepelným zpracováním dosaženy nejvyšší hodnoty meze pevnosti a tažnosti. Autor práce také vyvodil závěr, že zlepšené hodnoty mechanických vlastností varianty HS2 v porovnání s variantou HS3 (při jinak shodném chemickém složení) bylo způsobeno vyšším obsahem chromu.

V závěru práce jsou podobně jako v kapitole 2 v textu ukryté dosažené výsledky, jmenovitě:

- Byly navrženy vyrobeny a otestovány tři nové oceli odvozené od materiálu 22MnB5, jako nejlepší varianta vyšla ocel označená jako HS2.
- Byl realizován rozsáhlý soubor režimů „QP“ a byla identifikováno nastavení parametrů vedoucí k nejlepší kombinaci pevnosti i tažnosti.
- V rámci disertační práce byl vyvinut nový termomechanický simulátor umožňující realizovat plánované experimenty.

Některé moje připomínky:

- Předložená práce obsahuje 88 citací prací jiných autorů a 30 citací prací, v nichž je autor této práce spoluautorem. Dnešní výzkum nemohou samozřejmě provádět osamělí vědci, jsou to práce vesměs kolektivní. Přesto bych rád slyšel několik slov o vlastním příspěvku autora.
- Práce obsahuje množství obrázků dokumentujících vzniklé mikrostruktury, postrádám k nim ale (až na výjimky) hlubší diskusi?!
- V práci jsou na několika (málo) místech použity netechnické výrazy, např. „plechový vzorek“, „kulový vzorek“ nebo „rázové vlastnosti“, „tažná součást struktury“ apod. Doporučuji se těmto výrazům při ev. publikování práce vyhnout.
- Některé převzaté obrázky a tabulky jsou špatně čitelné, na obr. 3-11 chybí označení os.

- Práce také obsahuje řadu překlepů. Na odbornou kvalitu práce to ale nemá podle mého názoru zásadní vliv.
- V závěru disertační práce bych doporučil zdůraznit veškeré dosažené výsledky, které v textu závěru nejsou dostatečně vyzdvihnuty (např. vliv Cr).

Otázky:

1. Mohl byste, prosím, podrobněji popsat proces Hot Forming provedený v KH Rokycany a případně uvést tímto procesem získané a tím výchozí vlastnosti materiálů pro následující varianty QP procesu?
2. Můžete prezentovat průběhy zkoušek tahem (diagramy napětí – deformace) a vysvětlit na nich význam parametru $R_m \times A$? Jak a kde byly výsledky mechanických vlastností získávány, na stroji MTS?, při pokojové teplotě ?
3. Otázka přesného nastavení a měření teploty během celého procesu je pro konečné výsledky důležitá. Můžete, prosím, popsat, jakým způsobem byly použité termočlánky ověřovány co do přesnosti měření teploty a rychlosti jejich reakce na teplotní změny?
4. Jaké vidíte možnosti přenosu Vašich experimentálních výsledků do reálné praxe?

Na závěr konstatuji, že předložená disertační práce představuje rozsáhlý soubor zajímavých a pro další výzkum i praxi cenných pozitivních experimentálních poznatků, které jsou výsledkem intenzivní několikaleté práce. Cíle zformulované v úvodu práce byly podle mého názoru splněny. Doporučuji, aby po úspěšné obhajobě byl panu Ing. Josefu Káňovi ve smyslu zákonů České republiky udělen vědecký titul PhD., doktor.

V Plzni 5.1.2021



Prof. Ing. Václav Mentl, CSc.

doc. Ing. Martin Kusý, PhD.
Ústav materiálov, Materiálovotechnologická fakulta STU
J. Bottu 25, 917 24 Trnava

Oponentský posudok

Dizertačnej práce Ing. Jozefa Káni
na tému

Nekonvenční metody termomechanického zpracování materiálů

Predložená dizertačná práca je spracovaná v 7 kapitolách v rozsahu 68 strán s použitím 88 citovaných literárnych zdrojov. Práca obsahuje 77 obrázkov v tele práce, 12 obrázkov v prílohe a celkom 9 tabuliek.

(a) V práci sa autor venuje aktuálnej problematike spracovania AHSS ocelí určených predovšetkým pre konštrukcie karosérií motorových vozidiel. Aktuálnosť problematiky preukázateľne zdokumentoval doktorand na základe citovanej literatúry. Možno však dodať, že aktuálne zameranie dizertačnej práce dokumentuje trend zvyšovania bezpečnosti automobilov, znižovania ich hmotnosti a redukcie nákladov, tak produkčných ako neskôr aj prevádzkových. Tento trend je zreteľný z každodenného počínania výrobcov automobilov, ale aj z prijatých nariadení Európskej komisie. Aktuálnosť práce a jej prínos pre odbor doktorand potvrdil aj sériou publikácií, ktoré počas riešenia dizertačnej práce publikoval ako prvý autor (5 publikácií) alebo spoluautor (25 publikácií).

(b) Postup a zvolené metódy uvedené v dizertačnej práci hodnotím pozitívne. Autor už v kapitole 2 sformuloval ciele práce. K ich prehľadnosti by pomohlo štruktúrovanie kapitoly. Možno však konštatovať, že ciele boli sformulované logicky a zrozumiteľne.

Už sformulované ciele dizertačnú prácu rozdelili na oblasť: 1. vývoja experimentálneho zariadenia a 2. návrhu, výroby, spracovania a analýzy experimentálnych materiálov. V kapitole č. 3 sa autor práce venuje aktuálnemu stavu riešenej problematiky z pohľadu experimentálneho materiálu, jeho tepelného a termo-mechanického spracovania. V tejto kapitole tiež možno nájsť stručnú sumarizáciu vplyvu vybraných prvkov na výslednú mikroštruktúru QP ocelí. Obsah tejto kapitoly korešponduje s cieľom navrhnúť tri nové ocele s pozmeneným chemickým zložením, vhodné pre spracovanie metódou press hardening kombinovanou s QP tepelným spracovaním.

V 4. kapitole je spracovaná problematika riadenia procesu tepelného spracovania, ktorá bola nevyhnutným predpokladom k zvládnutiu realizácie jedného z cieľov, ktorý bol sformulovaný ako vývoj a odladenie skúšobného zariadenia pre termo-mechanické spracovanie ocelí.

Teoretické poznatky spracované v kapitole 3 a 4 logicky vyústili do experimentálnej časti, ktorá je v práci uvedená ako kapitola 5. V tejto kapitole je opísané navrhované chemické zloženie ocelí. Rovnako je tu opísaná ich príprava až do finálneho štádia plochého polotovaru, vhodného pre termo-mechanické spracovanie na vyvinutom skúšobnom zariadení. V tejto časti nechýbajú experimentálne (dilatometria) ako aj numerické (JMatPro) výsledky charakterizujúce teploty fázových premien. Rozsahom nenápadná avšak experimentálne náročná je kapitola návrhu experimentálneho programu a získanie potrebných dát. Jej existencia a fakt, že sa jej doktorand venoval, približujú laboratórne spracovanie experimentálnych zliatin vo vyvinutom termo-mechanickom simulátore podmienkam priemyselného spracovania.

Experimentálne zariadenie pre termo-mechanické spracovanie ocelí, povrchová úprava materiálov ako aj aplikácia termočlánkov je rozsiahlo a kvalitne spracovaná. V tejto časti mi však chýba aspoň stručne spracovaná charakteristika analytických zariadení, napr. mikroskopov, dilatometra, röntgenového difraktometra a podobne.

(c) Na základe diskusie v kapitole 6 a záverov sformulovaných v kapitole 7 môžem konštatovať, že počas riešenia dizertačnej práce dizertant vyvinul funkčný systém pre termomechanické spracovanie materiálov so spätno-väzobným riadením procesu ochladzovania. Dizertant tiež vytvoril ucelený súbor experimentálnych dát, ktoré charakterizujú tri experimentálne pripravené ocele. Uvedenými výsledkami dokázal, že ocele s označením HS1, HS2 a HS3 sú vhodné pre spracovanie technológiou press-hardening v kombinácii s QP spracovaním. Najlepšie výsledky súčiny pevnosti a ťažnosti boli dosiahnuté predovšetkým v prípade ocele HS2, konkrétne režimov QP240 PT270 s dobou prerozdelenia Pt300 a 600 s.

(d) Dizertačná práca je logicky usporiadaná tak, aby čitateľovi umožňovala dobrú orientáciu v problematike. Teoretický návrh a simulácie predchádzajú experimentálnemu overeniu a výsledkom. Grafy, obrázky, tabuľky a tiež prílohy sú väčšinou primerane kvalitné a vhodne dopĺňajú text práce.

(e) Publikáčna činnosť dizertanta je podľa môjho názoru na veľmi dobrej úrovni. Ako prvý autor sa s príspevkami zúčastňoval medzinárodných konferencií. Ako spoluautor participoval na dvoch desiatkach konferenčných príspevkov ako aj na časopiseckých výstupoch.

K práci mám tieto pripomienky:

1. Kvalitou výrazne zaostávajú obrázky 5-7 až 5-9.
2. Za nekvalitné, neostré, prípadne zle reprodukované považujem fotografie mikroštruktúr získaných svetelnou mikroskopiou.
3. Nedostatočný je popis mikroštruktúr, teda fáz a mikroštruktúrnych zložiek zdokumentovaných pomocou svetelnej a riadkovej elektrónovej mikroskopie v kapitole 5. K mikroštruktúram absentuje diskusia resp. posúdenie vplyvu mikroštruktúry na pozorované mechanické vlastnosti ocelí.
4. Výsledky obsahu zvyškového austenitu sú uvádzané v tabuľkách ako jeden z dôležitých hodnotiacich parametrov. Absentujú však akékoľvek bližšie informácie o vyhodnotení a postupe získania výsledkov.
5. Prácu sprevádza pomerne veľké množstvo preklepov a gramatických chýb.

Vyššie uvedené pripomienky však neznižujú odbornú úroveň predloženej práce.

K predloženej dizertačnej práci mám nasledujúce otázky:

1. V kapitole 5 uvádzate chemické zloženie navrhnutých ocelí, pričom vychádzajú z ocele 22MnB5. Mohli by ste zmeny v chemickom zložení týchto ocelí zdôvodniť s ohľadom na chemické zloženie niektorej QP ocelí? Aké zmeny ste sledovali pri zvýšení podielu Si, zmene podielu Mn a Cr. Zohľadňovali ste vplyv obsahu týchto prvkov aj na zvariteľnosť? Ak áno, ako ste hodnotili predpokladanú zvariteľnosť týchto ocelí?
2. V prípade experimentálnej ocele HS3 na strane 61 uvádzate, že „Nejvyšších hodnôt meze pevnosti bylo dosaženo právě u těchto režimů s přímým kalením z austenitizační teploty na RT a to 1728 MPa pro QT290 (čo asi malo byť QT260) a 1768 MPa pro QT310. V obou případech byla získána martenzitická struktura s malým podílem bainitu.“ Mohli by ste bližšie uviesť, ktorý typ bainitu ste pozorovali? Rozlíšenie dolného bainitu a martenzitu je prostriedkami svetelnej a aj riadkovej mikroskopie často pomerne zložité. Je možné na základe Vami uvedených mikroštruktúr, prípadne iných, ktoré neboli uvedené v práci, demonštrovať prítomnosť bainitu v oceli HS3? Akou inou mikroskopickou technikou by ste vedeli jednoznačne odlíšiť dolný bainit a martenzit?

3. Na obrázku 5-54 je mikroštruktúra HS3 QP348 PT550, PT600. Mohli by ste charakterizovať túto mikroštruktúru, ktorá sa zároveň výrazne odlišuje od predchádzajúcich mikroštruktúr, či už ocele HS3 alebo aj HS2 a HS1. Prítomnosť drobných útvarov s výrazne vyšším jasom je dôsledok kontaminácie vzorky z jej metalografickej prípravy, alebo dôsledok jej spracovania? Vedeli by ste bližšie komentovať tieto útvary a aj celkový charakter mikroštruktúry?
4. Mohli by ste prosím uviesť experimentálne detaily kvantitatívnej RTG difrakčnej analýzy? Aký postup bol použitý pre stanovenie podielu zvyškového austenitu? Výsledky podielu zvyškového austenitu uvádzate v hmotnostných alebo v objemových percentách?
5. Študovali ste vplyv *kamnárskeho tmelu* na lokálnu mikroštruktúru vzorky? Je možné sa spoľahnúť pri následných mechanických skúškach na úplnú homogenitu mikroštruktúry vzoriek aj v oblasti ležiacej pod tmelom?

(f) Napriek vyššie uvedeným pripomienkam odporúčam predloženú dizertačnú prácu k obhajobe (podľa zákona č. 111/1998 Sb. §47) a po jej obhájení a zodpovedaní vyššie uvedených otázok odporúčam udeliť Ing. Jozefu Káňovi titul Philosophiae doctor v odbore 3911V016 Materiálové inžénrství a strojírenská metalurgie.

V Trnave dňa: 19. 01. 2021

doc. Ing. , PhD.