

## OPONENTSKÝ POSUDOK DIZERTAČNEJ PRÁCE

1. **Meno a priezvisko doktoranda:** Ing. Danuše Langmajerová
2. **Názov dizertačnej práce:** Termomechanické zpracování vícefázových vysokopevných ocelí
3. **Študijný program:** P2301 Strojní inženýrství
4. **Študijný odbor:** 3911V016 Materiálové inženýrství a strojírenská metalurgie
5. **Univerzita, fakulta:** Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta strojní,  
Katedra materiálů a strojírenské metalurgie
6. **Meno a priezvisko školiteľa:** Prof. Dr. Ing. Bohuslav Mašek
7. **Meno a priezvisko školiteľa špecialistu:** Dr. Ing. Hana Jirková
8. **Meno a priezvisko oponenta dizertačnej práce:** doc. RNDr. Mária Behúlová, CSc.
9. **Pracovisko oponenta dizertačnej práce:** Slovenská technická univerzita v Bratislave  
Materiálovotechnologická fakulta so sídlom v Trnave  
Ústav výrobných systémov a aplikovanej mechaniky

### ***Aktuálnosť a význam dizertačnej práce pre odbor:***

Dizertačná práca Ing. Danuši Langmajerovej bola vypracovaná v dennej forme doktorandského štúdia na Katedre materiálov a strojírenské metalurgie Fakulty strojní Západočeskej univerzity v Plzni, v odbore Materiálové inženýrství a strojírenská metalurgie.

Práca sa zaoberá návrhom a optimalizáciou nekonvenčného termomechanického spracovania viacfázových nízkolegovaných vysokopevných ocelí za účelom získania ekonomicky úsporných materiálov, ktoré sa vyznačujú vynikajúcou kombináciou mechanických vlastností, predovšetkým vysokou pevnosťou pri zachovaní dostatočnej ťažnosti.

Z hľadiska teoretického, aplikačného a ekonomického je problematika práce vysoko aktuálna. Významným spôsobom prispieva k rozšíreniu poznatkov z oblasti nekonvenčného spracovania nízkolegovaných vysokopevných ocelí so zameraním na Q&P proces (quenching and partitioning process) s integrovanou inkrementálnou deformáciou. V práci je detailne analyzovaný vplyv relevantných technologických parametrov termomechanického spracovania s využitím Q&P procesu na mikroštruktúru a mechanické vlastnosti vybraných nízkolegovaných ocelí 42SiCr a 42MnCr. Získané výsledky poukázali na široké možnosti ovplyvňovania vývoja mikroštruktúry, ako aj mechanických vlastností týchto ocelí zmenou parametrov Q&P procesu a ochladzovacích stratégií.

Za významný prínos práce považujem taktiež transfer poznatkov, získaných na základe materiálovo-technologického modelovania pomocou laboratórneho simulátora termomechanického spracovania, do praxe - do reálneho výrobného reťazca technológie spätného rotačného pretláčania.

### ***Postup riešenia problematiky, zvolené metódy spracovania a splnenie stanovených cieľov dizertačnej práce:***

Dizertačná práca má 116 strán textu, obsahuje 17 tabuliek a 145 obrázkov, dokumentujúcich a podporujúcich údaje a tvrdenia v texte. Teoretická časť, v ktorej dizertantka rozpracovala základné východiská pre experimenty, tvorí približne 30 % práce. Táto časť je logicky usporiadaná, vhodne zameraná, spracovaná na požadovanej úrovni, a to na základe reprezentatívneho výberu literárnych prameňov (103 prác). Takmer 70 % citovaných prác bolo publikovaných v období posledných 10-tich

rokov. Pozitívne hodnotím, že pri spracovaní dizertačnej práce sa dizertantka opierala aj o práce vlastného pracoviska, včítane 4 publikácií, kde je sama autorkou, resp. spoluautorkou.

Kapitola 6 s názvom Motivace a cíle práce mohla byť spracovaná prehľadnejšie, ciele práce mohli byť špecifikované v jednotlivých bodoch (hlavný cieľ, čiastočné ciele, použité postupy a metódy pre ich dosiahnutie). Uvedená kapitola v niektorých častiach vyznieva skôr ako záver.

Experimentálna časť práce je spracovaná veľmi dôsledne, so znalosťou problematiky, s využitím fyzikálneho modelovania procesu termomechanického spracovania pomocou termomechanického simulátora. Vhodne sú volené experimentálne metódy analýzy a hodnotenia mikroštruktúr, fázového zloženia, podielu a stability zvyškového austenitu, ako aj relevantných mechanických vlastností skúmaných materiálov. Postupy termomechanického spracovania s integrovaným Q&P procesom, navrhnuté na základe výsledkov a poznatkov z materiálovo-technologického modelovania, boli následne aplikované pre reálny proces výroby dutých polotovarov technológiou spätného rotačného pretláčania. Aplikáciou rôznych parametrov termomechanického spracovania bolo vyrobených celkovo 9 demonštrátorov - dutých polotovarov z nízkoalegovaných ocelí 42SiCr a 42MnCr, ktoré boli opäť podrobené detailnej metalografickej analýze, fázovej analýze a skúškam mechanických vlastností.

Ing. Langmajerová v rámci riešenia dizertačnej práce realizovala rozsiahly experimentálny program a kvalifikovane spracovala a vyhodnotila značné množstvo experimentálnych výsledkov. Preukázala veľmi dobrú experimentálnu zručnosť a schopnosť nielen pôvodné výsledky získať, ale ich aj spracovať, posúdiť a vhodne interpretovať. Vzhľadom na získané originálne výsledky je možné konštatovať, že ciele dizertačnej práce boli splnené.

#### ***Dosiahnuté výsledky dizertačnej práce a konkrétny pôvodný prínos dizertanta:***

Dizertačná práca bola riešená v rámci projektu Výskumného centra 1M06032 Ministerstva školstva, mládeže a telovýchovy ČR a projektov GA ČR. Tematicky nadväzuje na dizertačné práce Dr. Ing. Hany Jirkovej a Ing. Jiřího Malinu, PhD., ako aj na ďalšie inovatívne práce kolektívu Výskumného centra tvárniacich technológií FORTECH.

Dizertačná práca rozširuje a prináša nové, originálne poznatky v oblasti výskumu a aplikácie nekonvenčného termomechanického spracovania vysokopevných nízkoalegovaných ocelí pre špecificky orientovanú energeticky úspornú výrobu dutých polotovarov s využitím inkrementálnych postupov tvárnenia a tepelného spracovania Q&P procesom.

V rámci modelového spracovania nízkoalegovaných vysokopevných ocelí 42SiCr a 42MnCr dizertantka odskúšala a porovнала stratégie tepelného a termomechanického spracovania, resp. postupy využívajúce Q&P proces. Analyzovala vplyv vybraných technologických parametrov termomechanického spracovania s integrovaným Q&P procesom (teploty prerozdelenia a doby výdrže na tejto teplote, veľkosti deformácie, rýchlosti ochladzovania na teplotu kalenia, rýchlosti ohrevu na austenitizačnú teplotu a doby zotrvania na austenitizačnej teplote) na mikroštruktúru a mechanické vlastnosti skúmaných ocelí. Optimalizáciou technologických parametrov spracovania skúmaných ocelí bola dosiahnutá unikátna kombinácia mechanických vlastností skúmaných ocelí, a to medza pevnosti v ťahu 2010 MPa pri ťažnosti na úrovni 17 %.

V ďalšej časti práce dizertantka potvrdila možnosť transferu výsledkov modelového termomechanického spracovania na reálny technologický proces spätného rotačného pretláčania. Duté polotovary, vyrobené technológiou spätného rotačného pretláčania s využitím navrhutej stratégie termomechanického spracovania, dosahovali pevnosť v ťahu na úrovni 1910 MPa pri tvrdosti 580 až 624 HV10 a ťažnosti 14-16 %.

Výsledky dizertačnej práce demonštrujú nové aplikačné možnosti nízkoalegovaných vysokopevných konštrukčných ocelí v oblasti ekonomicky efektívnej a ekologickej výroby tenkostenných rotačných produktov s vynikajúcimi mechanickými vlastnosťami.

### **Formálna a jazyková úroveň dizertačnej práce:**

Dizertačná práca je vypracovaná zodpovedne, použitá terminológia je v súlade so študijným odborom Materiálové inžénrství a strojírenská metalurgie. Konceptia dizertačnej práce, jej rozsah, obsahová, štylistická, jazyková a formálna stránka je na veľmi dobrej úrovni a zodpovedá stanoveným cieľom a rozsahu riešenej problematiky.

Grafická úroveň práce je taktiež veľmi dobrá; obrázky a tabuľky vhodne dopĺňajú písaný text práce. Treba oceniť najmä kvalitu prezentovaných mikroštruktúr, na druhej strane sú však popisy v niektorých grafoch a záznamoch príliš malé a ťažko čitateľné (napr. obr. 13, 47, 51-52, 62-64). Odkazy na obrázky a tabuľky nie sú vždy vhodne umiestnené (napr. odkaz na Tab. 14 je na strane 88, ale príslušná tabuľka sa nachádza až na str. 98).

Pripomienku mám k používaniu veľkého množstva skratiek, z ktorých niektoré nie sú v zozname skratiek vysvetlené, resp. sú používané nejednotne alebo neopodstatnene, nakoľko sa v práci vyskytujú len jeden, či dvakrát (príklady vid' nižšie). Používanie skratiek do určitej miery znižuje prehľadnosť a čitateľnosť práce.

Autoreferát dizertačnej práce je spracovaný na požadovanej úrovni a poskytuje technickej verejnosti výstižnú informáciu o riešenej problematike a dosiahnutých výsledkoch.

### **Publikačná činnosť dizertanta:**

Publikačná činnosť Ing. Langmajerovej je pomerne bohatá. V súpise publikovaných prác dizertantka uvádza 17 prác (u 5-ich je jedinou alebo prvou autorkou), z ktorých 15 bolo prezentovaných na domácich a zahraničných konferenciách, 2 sú publikované v zahraničných časopisoch. Z uvedených prác je 6 evidovaných v databáze Web of Science (WoS), 3 v databáze Scopus. O kvalite publikovaných prác svedčia 2 citácie podľa WoS, resp. Scopus (s vylúčením autocitácií všetkých spoluautorov).

### **Pripomienky a otázky:**

Dizertantka sa pri spracovaní dizertačnej práce nevyhla drobným chybám, preklepom a nedostatkom, ktoré však neznižujú jej celkovo výbornú odbornú úroveň, napr.:

- str. 5 a 18 – preklep v nadpise: Dlouhodobého nízkoteplotního žíhaní na bainit ;
- str. 7 – nesúlady medzi českým a anglickým vysvetlením skratiek (prístroj/metóda), napr. TEM transmisní elektronový mikroskop (Transmission electron microscopy);
- str. 12 – skratky v obr. 1 nezodpovedajú skratkám v zozname skratiek a symbolov, ani popisom v obr. 1 na str. 11;
- niektoré použité skratky a symboly nie sú vysvetlené (napr. RA, B<sub>s</sub>, IF ocele, I, F), ďalšie sú v texte vysvetlené viackrát (napr. TMZ 2x na str. 36);
- nejednotné objasnenie skratiek a symbolov (napr. A<sub>r1</sub> a A<sub>r2</sub> inak vysvetlené v zozname skratiek, na str. 47 a str. 48, QT je v zozname skratiek a na str. 30 teplota kalenia, ale v obr. 14 teplota prechlazení);
- str. 29 – teplota přechlazení je označená ako PT, čo je teplota prerozdelenia;
- nedôslednosť pri použití pojmov teplota kalenia, resp. kalica teplota a teplota prerozdelenia je aj na str. 33;
- v zozname použitej literatúry sú citované práce pod číslom [26] a [30] identické;
- odkazy na literatúru by mali byť v texte uvádzané pred koncom vety, t. j. pred bodkou na konci vety;
- obr. 53 a 55 - absentuje mierka pre deformáciu;
- na str. 98 je nesprávne uvedený odkaz na Tab. 13;

- termín „kalenie“/„kalený“ je v práci viackrát použitý ako synonymum slova ochladzovanie/ochladzovaný, resp. rýchle ochladzovanie/rýchle ochladzovaný;
- teplota prechladení (QT) je v anglickej literatúre označovaná ako „quenching temperature“ a rozdiel  $\Delta T = M_s - QT$  ako „undercooling“, t. j. podchladenie. Z tohto dôvodu nepovažujem termín „prechladení“, resp. „teplota prechladení“ za celkom adekvátny;
- kap. 7.4.6, str. 57: namiesto termínu „optimalizácia“ parametrov termomechanického spracovania by bolo vhodnejšie použiť slovné spojenie „analýza vplyvu“ parametrov termomechanického spracovania, nakoľko v práci neboli použité žiadne optimalizačné metódy.

K dizertačnej práci mám nasledujúce otázky, resp. námety do diskusie:

1. Programový systém JMatPro umožňuje o. i. výpočet ARA diagramu na základe zadaného chemického zloženia ocele. Prečo nebolo pre výpočet ARA diagramu ocele 42SiCr (obr. 33) použité chemické zloženie ocele, uvedené v Tab. 2? Nie sú odchýlky medzi vypočítanými a experimentálne nameranými teplotami fázových transformácií pre oceľ 42SiCr (Tab. 4) spôsobené odlišným chemickým zložením? Aký vplyv na teploty fázových premien má teplota austenitizácie a veľkosť austenitického zrna?
2. Aký je rozdiel medzi nestabilným, metastabilným a zvyškovým austenitom?
3. V Tab. 7 sú uvedené aplikované režimy termomechanického spracovania ocele 42SiCr a ich výsledky. Koľko vzoriek bolo spracovaných jednotlivými režimami termomechanického spracovania? Predstavujú údaje v Tab. 7 výsledky štatistického spracovania meraní?
4. Základným princípom Q&P procesu, ako uvádzate aj Vy napr. na str. 21, je rýchle ochladenie materiálu z teploty austenitizácie na teplotu ležiacu medzi teplotami  $M_s$  a  $M_f$  a následný ohrev a výdrž na teplote prerozdelenia PT tesne pod teplotou  $M_s$ , počas ktorej dochádza k obohateniu metastabilného austenitu uhlíkom, ktorý difunduje z presýteného martenzitu. Prečo bola pri „optimalizácii“ teploty prerozdelenia (kap. 7.4.6.1) uvažovaná len jedna teplota izotermickej výdrže pod teplotou  $M_s$ ?  
  
Teplota prerozdelenia a doba výdrže na tejto teplote má kritický vplyv na vývoj výslednej mikroštruktúry a mechanických vlastností materiálu pri jeho spracovaní s využitím Q&P procesu. Vedeli by ste z teoretického hľadiska vysvetliť vplyv teploty prerozdelenia na vývoj mikroštruktúry skúmanej ocele?
5. Oceľ 42SiCr obsahuje 2,04 hmot% kremíka. Neprejavila sa pri ohreve tyčového polotovaru z ocele 42SiCr na austenitizačnú teplotu v peci zvýšená náchylnosť tohto materiálu na oxidáciu povrchu?

#### **Záverčné stanovisko:**

*Predložená dizertačná práca Ing. Danuši Langmajerovej s názvom „Termomechanické zpracování vícefázových vysokopevných ocelí“ spĺňa požiadavky kladené na doktorskú dizertačnú prácu, a preto odporúčam, aby bola v súlade so Zákonom č. 111/1998 Zb. §47 prijatá k obhajobe.*

*Po úspešnej obhajobe dizertačnej práce navrhujem Ing. Danuši Langmajerovej udelenie akademického titulu PhD. (philosophiae doctor) odbore Materiálové inženýrství a strojírenská metalurgie.*

V Trnave, dňa 28. 10. 2013

doc. RNDr. Mária Behúlová, CSc.  
oponent dizertačnej práce

**Posudek disertační práce Ing. Danuše Langmajerové:**

### **Termomechanické zpracování vícefázových vysokopevných ocelí**

Předkládaná práce má teoretickou a experimentální část. V teoretické části je přehledně uvedeno nejen shrnující pojednání o vysokopevných nízkolegovaných ocelí, ale i teoretické principy některých fyzikálně-metalurgických jevů. Především je pozornost věnována obecnému popisu QP efektu, jehož vliv je sledován i v experimentální části práce. QP efekt je podrobně popsán, včetně vlivu jednotlivých prvků na transformační vlastnosti a včetně teorie difuze uhlíku z přesyceného martenzitu do metastabilního austenitu. Kapitoly 4.1. – 4.3. představují skutečně aktuální poznatky o mechanizmech stabilizace austenitu v nízkolegovaných ocelích a potlačení precipitace karbidů. Tyto dva jevy mohou, pokud je dosažena jemná martenzitická struktura, účinně zvýšit tažnost materiálu při velmi vysoké pevnosti. Je zde detailně vysvětleno, jaká struktura se má při řízeném termomechanickém zpracování vyvíjet, aby bylo co nejúčinněji dosaženo QP efektu. Vzhledem k zaměření teoretické části práce by ve výčtu vysokopevných nízkolegovaných ocelí mohly být rovněž uvedeny oceli se středním obsahem manganu, u kterých se podle jejich chemického složení může dosahovat buď TRIP nebo TWIP efektu.

Vlastní experimentální část práce je rovněž rozdělena na dvě etapy. V první etapě jsou zpracovávány vzorky dvou druhů nízkolegovaných ocelí na termomechanickém simulátoru, s cílem dosažení QP efektu, maximálního množství stabilizovaného zbytkového austenitu ve struktuře a co nejlepší kombinace vlastností. V návaznosti na teoretickou část práce jsou zde vytipovány parametry, které je zapotřebí optimalizovat. Na základě vlastních provedených termofyzikálních měření, na základě naměřených dat z literatury a na základě výpočtů v programu JMatPro jsou velmi promyšleně stanoveny limitní hodnoty parametrů, mezi kterými je optimalizace prováděna. Výsledkem optimalizace je zjištění, které parametry mají na vývoj mikrostruktury a mechanických vlastností významný vliv a u kterých naopak vzniká větší interval, v rámci kterého může technologie probíhat. Bylo zjištěno, že implementací termomechanického zpracování s QP procesem lze u oceli 42SiCr skutečně významně zvýšit tažnost tohoto materiálu při zachování vysoké pevnosti. Bylo dosaženo pevnosti v tahu 1960 MPa při tažnosti 17%, což je skutečně vynikající výsledek. Námětem k diskusi je přesnost měření na mini tahových zkouškách, zejména přesnost měření tažnosti, meze kluzu a vrubové houževnatosti.

Ve druhé etapě byly zpracovávány již prototypové polotovary na experimentálním technologickém zařízení pro rotační zpětné protlačování. Proces rotačního zpětného protlačování byl prováděn při několika různých termomechanických režimech, z nich jeden byl režim s QP procesem. Integrace QP procesu navázala na poznatky z první části experimentální práce. Byla snaha o dodržení parametrů optimalizovaných v první části práce, jak z hlediska průběhu teploty, tak z hlediska účinku inkrementální deformace. Tento experiment byl úspěšný, protože bylo dosaženo velmi dobrých mechanických hodnot a požadované mikrostruktury se stabilizovaným zbytkovým austenitem. Výsledky byly porovnávány s jinými režimy zpracování – jeden prototyp byl zakalen do vody, druhý byl vychlazen na vzduchu. Mezi těmito prototypy byl materiál zpracovaný QP procesem jasně

nejlepší, otázkou je, proč byly pro porovnání vlastností vybrány právě režimy po prudkém zchlazení do vody a po pomalejším chladnutí na vzduchu.

Práce plní všechny předpoklady pro úspěšnou obhajobu. Příkladně zde na sebe navazují pečlivě zpracovaná teoretická část s velmi kvalitním experimentem na vzorcích doplněným dokonce technologickým zpracováním demonstrátorů. Výsledky experimentu jsou velmi cenné a budou určitě významnou inspirací pro výzkum vysokopevných nízkolegovaných ocelí v mezinárodním měřítku. Rovněž teoretická část je velmi hodnotná, její studium může obohatit mnoho zájemců o tuto problematiku. Po formální stránce nemám k práci rovněž žádné připomínky, její zpracování je nadprůměrně pečlivé.

**Doporučuji práci k obhajobě.**

Dotazy k práci:

1. Jaká je morfologie zbytkového austenitu v ocelích, ve kterých byl dosažen QP efekt? Vyjádřete se, prosím k této otázce jak z hlediska Vašich poznatků z literatury, tak z hlediska zkušeností získaných ve vlastní práci.
2. Jak ovlivňuje průběh QP efektu, mikrostrukturu a vlastnosti vložená deformace? Zvyšuje skutečně stabilitu zbytkového austenitu? Pokud ano, proč tomu tak je?
3. Proč byly demonstrátory vyrobené rotačním zpětným protlačováním zpracovány prudkým ochlazením do vody bez popuštění anebo ochlazováním na vzduchu a následně porovnávány s polotovarem zušlechtěným s QP efektem?
4. Byl v termomechanicky zpracovaném prototypu prokazatelně dosažen QP efekt, když byl podíl zbytkového austenitu kolem 9%?
5. Jaká byla metodika měření mechanických vlastností na minivzorcích?

V Dobřenech 26.9. 2013

Zbyšek Nový

