

ANALÝZA ROZLOŽENIA TEPLÔT V SKÚŠOBNÝCH VZORKÁCH PRI PRIAMOM ELEKTRICKOM OHREVE

ANALYSIS OF TEMPERATURE DISTRIBUTION IN SAMPLES BY DIRECT ELECTRICAL HEATING

Mária BEHÚLOVÁ, Hana STAŇKOVÁ, Bohuslav MAŠEK

Autori: **RNDr. Mária Behúlová⁽¹⁾, CSc., Ing. Hana Staňková⁽²⁺³⁾,
Prof. Dr. Ing. Bohuslav⁽²⁺³⁾ Mašek**

Pracovisko: **(1) Katedra aplikovanej mechaniky MfF STU v Trnave,
(2) Výzkumné centrum tvářecích technologií FORTECH, FS ZČU Plzeň,
(3) Fakultät für Maschinenbau, TU Chemnitz**

Adresa: **Paulínska 16, 917 24 Trnava, Univerzitní 8, 306 14 Plzeň, ČR,
Erfenschlager Str. 73, D-09107 Chemnitz, Germany**

Tel.: **+421 918-646 022**

E-mail.: **maria.behulova@stuba.sk, hstankov@kmm.zcu.cz,
bohuslav.masek@mb.tu-chemnitz.de**

Abstract

Nové metódy a postupy termomechanického spracovania (TMS) materiálov sú experimentálne testované pomocou termomechanických simulátorov. Z hľadiska následného skúmania vplyvu termomechanického spracovania na mikroštruktúru, mechanické a úžitkové vlastnosti materiálov sa požaduje, aby pri elektrickom ohreve bolo v aktívnej valcovej časti používaných skúšobných vzoriek teplotné pole homogénne. Cieľom príspevku je vypracovanie simulačného modelu pre numerickú analýzu teplotných polí pri priamom elektrickom ohreve a porovnanie rozloženia teplôt v skúšobných vzorkách rôznych tvarov. Združená elektrická a tepelná analýza bola realizovaná pomocou programového systému ANSYS 10.0. Na základe výsledkov numerickej simulácie bol navrhnutý tvar vzorky s minimálnymi teplotnými rozdielmi v jej aktívnej valcovej časti.

Newly designed methods and procedures of termomechanical treatment (TMT) of materials are tested using termomechanical simulators. For the following examination of the influence of TMT on the microstructure, mechanical and utility properties of materials, the temperature field in the active parts of electrically heated samples is required to be homogeneous. The aim of this work was to develop the simulation model for numerical analysis of temperature fields by direct electrical heating and to compare the temperature distribution in the test samples with various shapes. Coupled electrical and thermal analysis was performed using the program code ANSYS 10.0. Based on the results of numerical simulation, the shape of a test sample with minimum temperature differences in its active cylindrical part was proposed.

Key words

numerická simulácia, priamy elektrický ohrev, teplotné pole

numerical simulation, direct electrical heating, temperature fields

Úvod

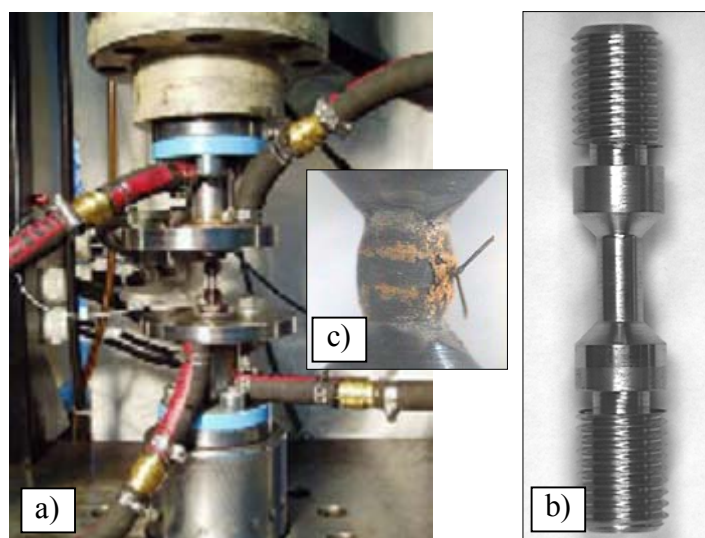
V súvislosti s rozvojom v oblasti automobilového priemyslu sa v poslednom období kladie pri skúmaní vysokopevných nízkoalegovaných ocelí značný dôraz na špeciálne spôsoby termomechanického spracovania (TMS). Malé množstvo legujúcich prvkov môže v kombinácii s termomechanickým spracovaním pozitívne ovplyvňovať homogenitu mikroštruktúry a veľkosť zrna [1-3], zvyšovať pevnosť, ťažnosť, ako aj únavové vlastnosti materiálu [4-6]. Tvárnenie pri relatívne nízkych teplotách umožňuje dosiahnuť vyššiu tvárnosť nízkoalegovaných ocelí a to pri zachovaní presnosti výroby zodpovedajúcej tvárneniu za studena.

Navrhované postupy termomechanického spracovania sú vyvíjané pomocou skúšok na termomechanických simulátoroch. Pre ohrev skúšobných vzoriek sa využíva spravidla priamy elektrický ohrev. Z hľadiska následného skúmania vplyvu termo-mechanického spracovania na mikroštruktúru, mechanické a úžitkové vlastnosti materiálov sa požaduje, aby v aktívnej valcovej časti skúšobných vzoriek bolo teplotné pole čo najhomogénnejšie, t. j. aby v tejto časti vzorky boli pokiaľ možno minimálne teplotné rozdiely.

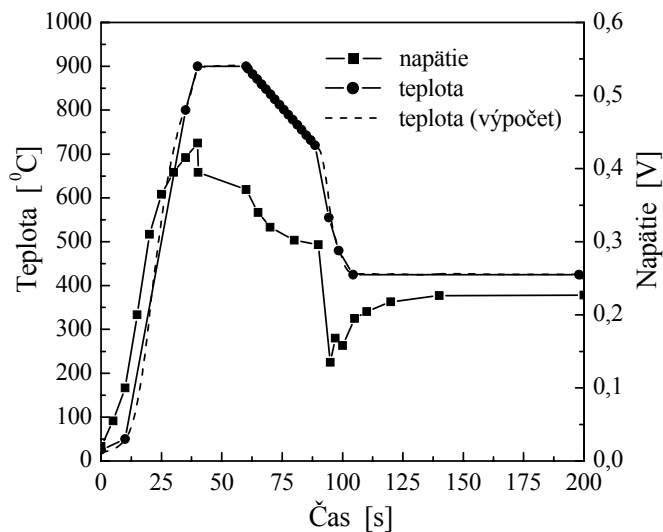
Príspevok sa zaoberá numerickou simuláciou elektrických a teplotných polí pri priamom elektrickom ohreve skúšobných vzoriek rôznych tvarov. Cieľom numerickej analýzy je navrhnúť tvar vzorky, ktorý je z hľadiska homogenity teplotného poľa v aktívnej časti vzorky najvýhodnejší pre simuláciu termomechanického spracovania ocelí.

Experiment

Experimentálne meranie teplôt pri priamom elektrickom ohreve skúšobnej vzorky (obr. 1) bolo realizované na TU Chemnitz. Vzorka bola vyrobená z ocele s chemickým zložením 0,1C-0,25Si-1,25Mn-0,3Ni-0,01N-0,03Al [hmot. %]. Na povrch valcovej časti v strede vzorky bol po odporovom privarení Ni-CrNi termočlánku nanesený ochranný antioxidačný náter. Vzorka bola upevnená do vodou chladených čelustí, ktoré zároveň slúžili na prívod prúdu pre priamy odporový ohrev. Časová závislosť nameraných teplôt a napätí je znázornená na obr. 2b.



Obr. 1. Experimentálne meranie teplôt pri odporovom ohreve
a) termomechanický simulátor, b) tvar skúšobnej vzorky, c) aktívna časť vzorky s privareným termočlánkom po termomechanickom spracovaní

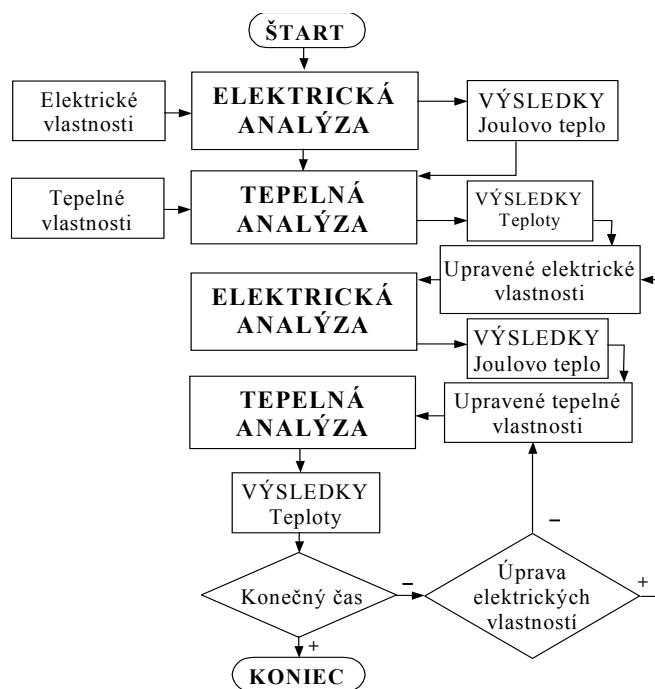


Obr. 2. Časová závislosť napätia, nameraných a vypočítaných teplôt

Výsledky experimentálneho merania boli použité pre verifikáciu simulačného modelu procesu priameho elektrického ohrevu, ktorý bude popísaný v ďalšej časti. Čiarkovanou čiarou sú do grafu (obr. 2) vynesené teploty, vypočítané pomocou numerickej simulácie odporového ohrevu v podmienkach experimentu s využitím konečno-prvkového programového systému ANSYS 10.0.

Z porovnania teplôt nameraných počas experimentu a vypočítaných na základe simulačného modelu vyplýva, že zvolenú metodológiu je možné aplikovať pri numerickej analýze teplotných polí v odporovo ohrievaných vzorkách.

Simulačný model



Obr. 3. Schéma riešenia združenej elektrickej a tepelnej úlohy

Analýza teplotných polí pri priamom odporovom ohreve bola realizovaná s využitím programového systému ANSYS, verzia 10.0 [7]. Pri numerickej simulácii odporového ohrevu je nevyhnutné riešiť zduženú nestacionárnu elektrickú a tepelnú úlohu (obr. 3).

Prepojenie elektrickej a tepelnej analýzy je determinované závislosťou elektrických vlastností ohrievaného materiálu od teploty a na druhej strane závislosťou Joulovho tepla, ktoré predstavuje vnútorný zdroj tepla pre tepelnú analýzu, od elektrických vlastností materiálu. Joulovo teplo, vypočítané na základe analýzy elektrických polí, vstupuje ako zaťaženie do nestacionárnej tepelnej analýzy. Rozloženie teplôt v danom čase tvorí vstupné dáta pre následnú analýzu elektrického poľa.

Analýza elektrických polí je založená na riešení Laplaceovej rovnice v tvare [8]

$$\operatorname{div}(\sigma \operatorname{grad} V) = 0, \quad (1)$$

kde σ je elektrická vodivosť materiálu a V je elektrický potenciál.

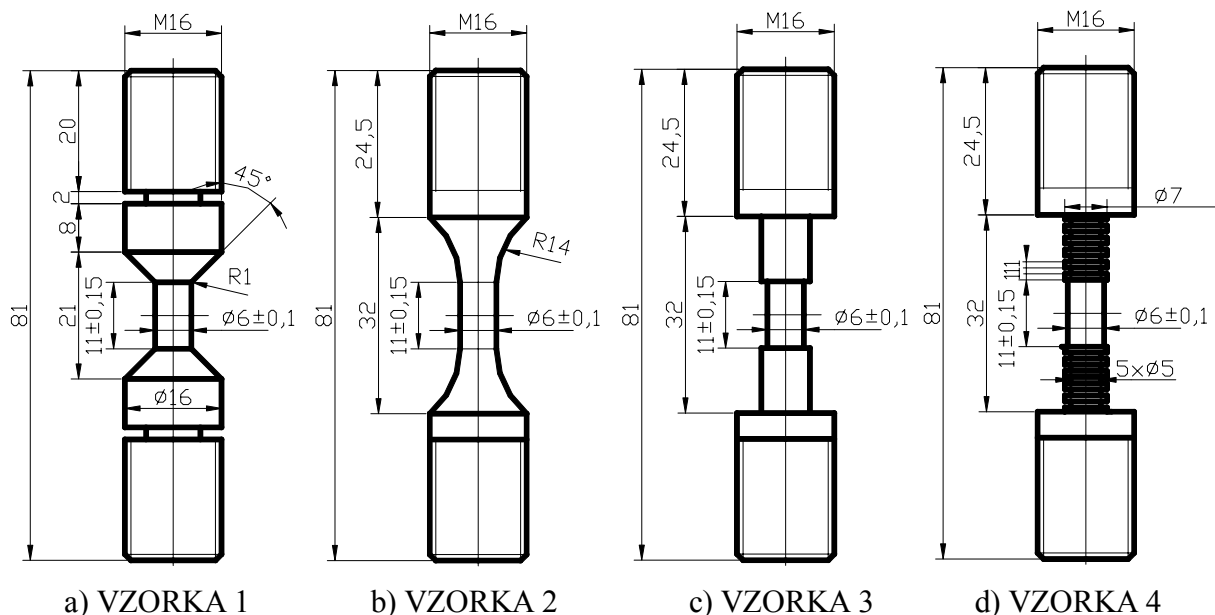
Nestacionárne vedenie tepla v tuhých telesách popisuje Fourierova-Kirchhoffova parciálna diferenciálna rovnica [9, 10],

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial t} = \operatorname{div}(\lambda \operatorname{grad} T) + q_v, \quad (2)$$

kde ρ je hustota, c je špecifická tepelná kapacita, λ je koeficient tepelnej vodivosti a q_v je objemová hustota vnútorných zdrojov tepla, t. j. teplo generované v jednotkovom objeme za jednotku času. Pri odporovom ohreve závisí tento člen od Joulovho tepla, generovaného v ohrievanom materiáli pri prechode striedavého elektrického prúdu. Pre jednoznačné riešenie Fourierovej-Kirchhoffovej diferenciálnej rovnice vedenia tepla je potrebné definovať podmienky jednoznačnosti, a to geometrické, fyzikálne, začiatkové a okrajové [10-11].

Pre simuláciu termomechanického spracovania materiálov boli navrhnuté a analyzované štyri typy vzoriek s odlišným tvarom (obr. 4). Všetky vzorky majú dĺžku 81 mm a sú na koncoch opatrené závitom na upevnenie vzorky do čelustí. Aktívna, stredná časť vzoriek má valcový tvar s priemerom 6 mm a dĺžkou 11 mm. Vzorka 1 (obr. 1a, 4a) má nosnú časť zloženú z kužeľovej a valcovej časti. Pred upínacou časťou je vzorka opatrená vrubom. Vzorka 2 (obr. 4b) má rozširujúcu sa nosnú časť s postupným prechodom z aktívnej do upínacej časti vzorky. U vzorky 3 je nosná časť valcová s priemerom menším ako v upínacej časti vzorky. Vzorka 4 (obr. 4c) má v nosnej valcovej časti päť vrubov.

Termofyzikálne a elektrické vlastnosti ocele boli zadávané v závislosti od teploty. Začiatková teplota vzoriek bola predpokladaná 20 °C. V osi vzoriek boli definované podmienky symetrie. Konce vzoriek boli zaťažované časovo premenným napäťovým spádom. Počas prvých desiatich sekúnd bol zadán rozdiel napätí na koncoch vzoriek $U = 0,5$ V s následným poklesom na hodnotu $U = 0,47$ V v ďalšom priebehu ohrevu.



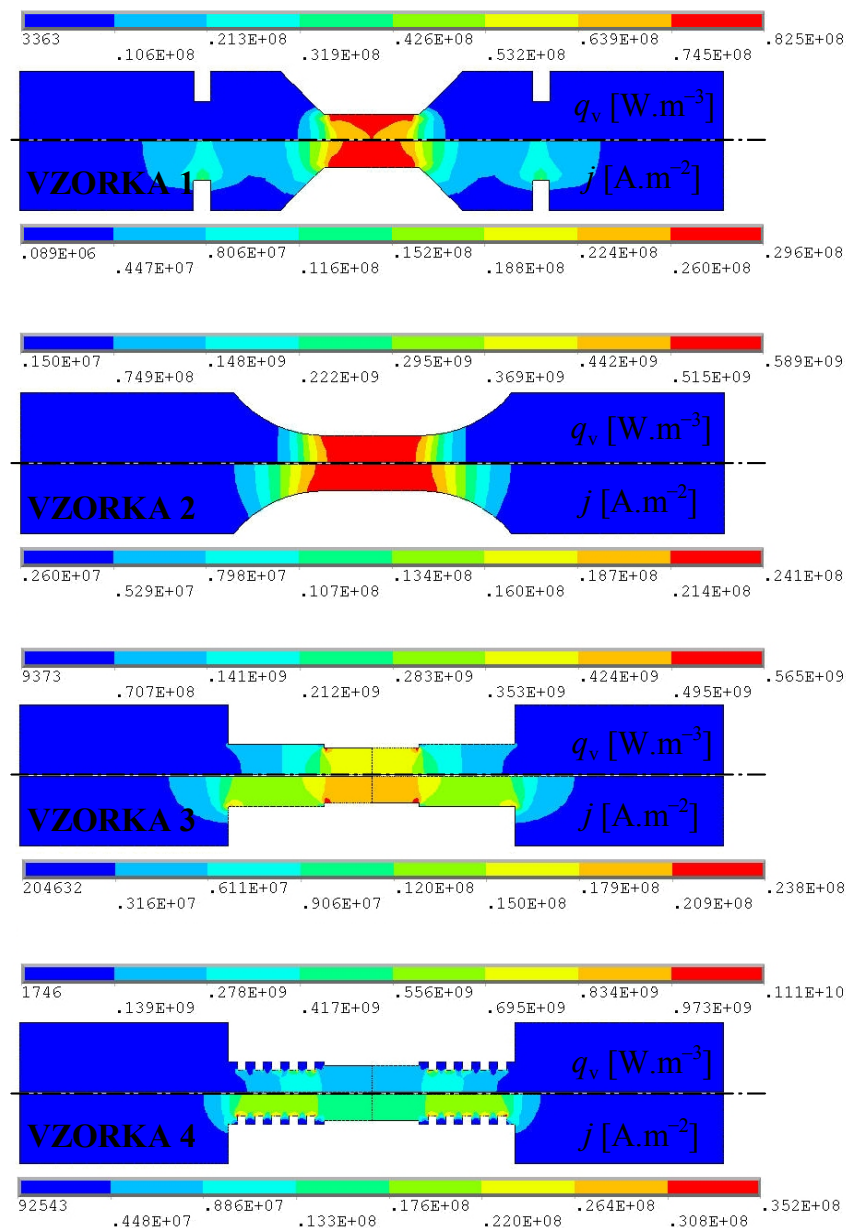
Obr. 4. Tvar a rozmery analyzovaných vzoriek

Pomocou okrajovej podmienky 3. druhu bolo zohľadnené ochladzovanie povrchu vzoriek mechanizmom konvekcie a radiácie. Koeficient prestupu tepla konvekciou bol počítaný v rámci užívateľsky definovaného podprogramu v závislosti od povrchovej teploty vzorky pri predpokladanej teplote okolitého vzduchu 20 °C. Výpočet koeficientov ožiarenia a tepelného

toku radiáciou bol zabezpečený priamo programovým systémom ANSYS. Doba ohrevu vzoriek bola 60 sekúnd.

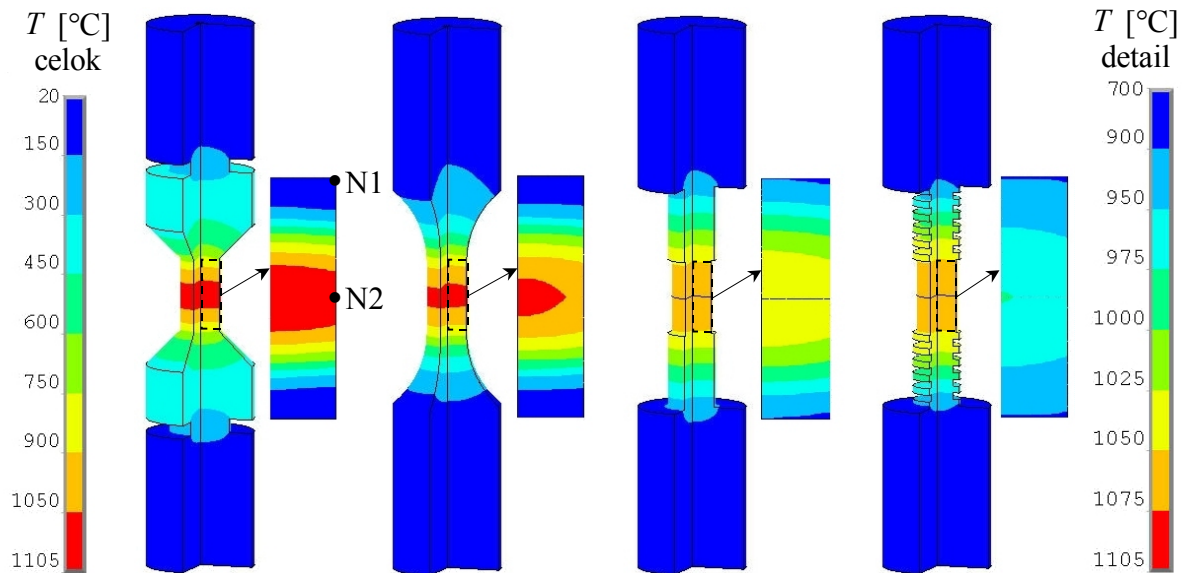
Výsledky numerickej simulácie

K ohrevu vzoriek pri odporovom ohreve dochádza v dôsledku Joulovho tepla, generovaného vo vnútri vzoriek vplyvom prechodu elektrického prúdu. Rozloženie prúdovej hustoty j [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$] a vnútorných zdrojov tepla (Joulovho tepla) q_v [$\text{W}\cdot\text{m}^{-3}$] vo vzorkách 1 – 4 na konci ohrevu v čase 60 sekúnd ilustruje obr. 5. Najvyššie hustoty prúdu boli vypočítané vo vzorkách v oblastiach ostrých hrán a zúžených prierezov. Maximálne prúdové hustoty a objemové hustoty generovaného Joulovho tepla boli zaznamenané u vzorky 4.



Obr. 5. Rozloženie prúdovej hustoty j [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$] a vnútorných zdrojov tepla (Joulovho tepla) q_v [$\text{W}\cdot\text{m}^{-3}$] vo vzorkách 1 – 4 v čase 60 sekúnd

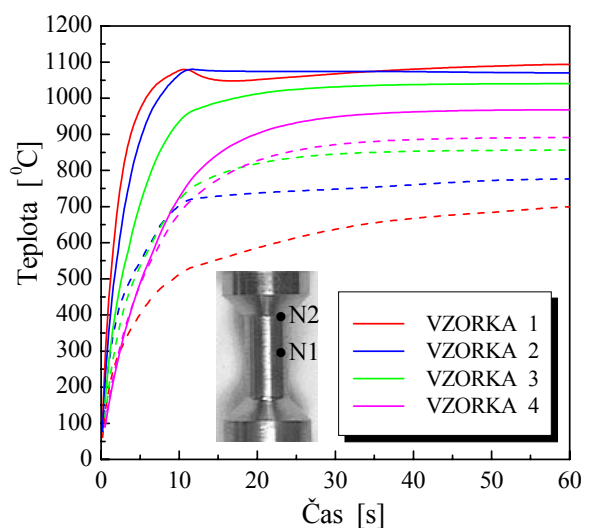
Na obr. 6 sú znázornené teplotné polia v jednotlivých analyzovaných tvarovo odlišných vzorkách na konci procesu ohrevu v čase 60 sekúnd. Ku každej vzorke je pripojený detail rozloženia teplôt v aktívnej valcovej časti v strede vzorky, ku ktorému prislúcha mierka na pravej strane obrázku.



Obr. 6. Rozloženie teplôt vo vzorkách 1-4 na konci odporového ohrevu v čase 60 sekúnd

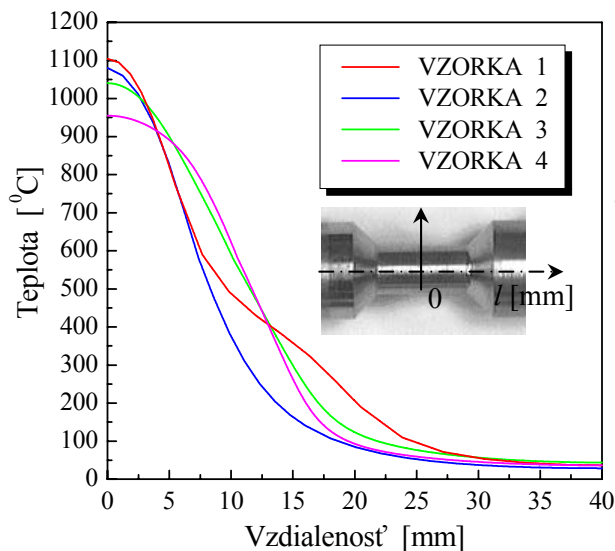
Teploty v upínacích častiach vzoriek, zaskrutkovaných do čeľustí chladených vodou, sú približne rovnaké u všetkých analyzovaných tvarov vzoriek a pohybujú sa v rozsahu 20 °C až 200 °C. Maximálna teplota na konci ohrevu 1105 °C bola vypočítaná vo vzorke 1. Maximálne teploty vzoriek 3 a 4 sú nižšie ako maximálna teplota dosiahnutá pri ohreve vzoriek 1 a 2, avšak teplotné rozdiely v aktívnej valcovej časti vzoriek 3 a 4 sú podstatne menšie. Najhomogénnejšie teplotné pole s najmenšími teplotnými rozdielmi v aktívnej časti je vo vzorke 4 s piatimi vrubmi vo valcovej nosnej časti vzorky.

Z časových závislostí teplôt (obr. 7) v uzlových bodoch N1 a N2 na povrchu vzoriek v strede a na konci ich aktívnej časti vyplýva, že rozloženie teplôt v aktívnej časti vzoriek sa od času 30 sekúnd do konca ohrevu mení len minimálne. Najväčšie teplotné rozdiely počas celej doby ohrevu sú vo vzorke 1. Uzlový bod N1 zodpovedá umiestneniu termočlánku (obr. 1), ktorým sa meria teplota počas simulovaného termo-mechanického spracovania. Na základe tohto merania teploty sa reguluje priebeh ohrevu a následného deformačného procesu. Vzhľadom na získané výsledky numerických analýz teplotných polí vo vzorkách sa odporúča meranie teploty ďalším termočlánkom, ktorý by bol privarený na koniec aktívnej časti vzorky v bode, ktorý zodpovedá polohe uzlového bodu N2.

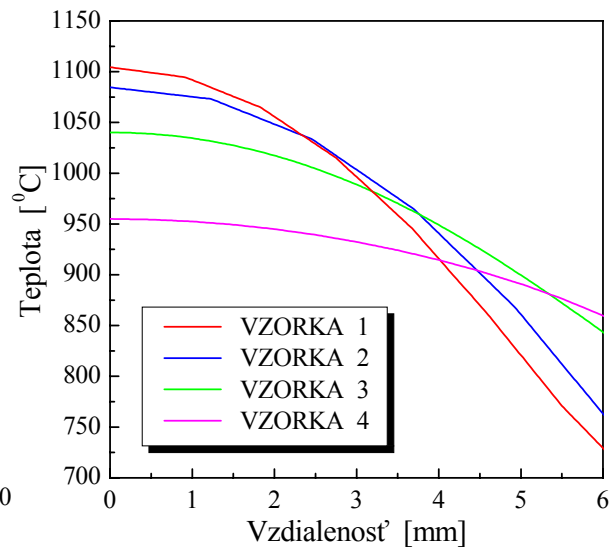


Obr. 7. Časové závislosti teplôt v uzlových bodoch N1 (čierne krivky) a N2 N1 (šedé krivky) v aktívnej časti vzoriek

Pre posúdenie teplotných rozdielov vo vnútri vzoriek a ich presnú kvantifikáciu boli na záver analyzované teploty pozdĺž osi rotácie jednotlivých vzoriek na konci ohrevu v čase 60 sekúnd (obr. 8). Teploty pozdĺž osi rotácie v aktívnej časti vzorky sú znázornené v detaile na obr. 9. Ako vyplýva z obr. 9, maximálne teplotné rozdiely sú vo vzorke 1, a to približne až 330 °C. Z hľadiska homogenity teplotného poľa v aktívnej časti vzorky je najvhodnejší tvar vzorky 4, u ktorej boli vypočítané teplotné rozdiely 78 °C.



Obr. 8. Závislosť teplôt pozdĺž osi rotácie jednotlivých vzoriek v čase 60 sekúnd



Obr. 9. Detail závislosti teplôt pozdĺž osi rotácie v aktívnej časti vzoriek v čase 60

Záver

Hlavným cieľom práce bolo navrhnúť tvar skúšobnej vzorky, ktorý by bol optimálny z hľadiska homogenity teplotného poľa v aktívnej časti vzorky. Pre numerickú analýzu teplôt pri odporovom ohreve štyroch tvarovo odlišných vzoriek bol vypracovaný a verifikovaný simulačný model, zahŕňajúci tvorbu geometrického a konečno-prvkového modelu skúšobných vzoriek, zadanie materiálových vlastností, začiatočných podmienok, zaťaženií a okrajových podmienok. Numerické riešenie bolo realizované konečno-prvkovým programovým systémom ANSYS 10.0.

Na základe numerických analýz teplotných polí pri priamom odporovom ohreve je možné pre skúšky termo-mechanického spracovania ocelí odporovať vzorku 4 s piatimi vrubmi v nosnej časti vzorky. Zároveň sa odporúča meranie teploty počas experimentu dvoma termočlánkami, umiestnenými na povrchu vzorky v strede a na konci jej aktívnej časti. Pre posúdenie stability vzorky 4 sa ďalej navrhuje realizovať numerickú analýzu tejto vzorky na vzper.

Vlastný vedecký prínos

Pre riešenie problematiky priameho odporového ohrevu bola navrhnutá a verifikovaná metodológia riešenia združenej elektrickej a tepelnej úlohy pomocou programového systému ANSYS. Na základe vypracovaného simulačného modelu boli analyzované teplotné polia pri odporovom ohreve tvarovo odlišných skúšobných vzoriek pre simuláciu termo-mechanického spracovania ocelí.

Simulačný model bude možné využívať ako nástroj pre overovanie vhodnosti tvaru pri vývoji nových skúšobných vzoriek, ako aj na predikciu rozloženia teplôt v skúšobných vzorkách pre experimentálne modelovanie termo-mechanického spracovania iných typov materiálov.

PodĎakovanie

Príspevok vznikol s podporou VEGA MŠ SR a SAV v rámci riešenia projektu č. 1/2073/05 a Výzkumného centra tvárečích technológií FORTECH.

Zoznam bibliografických odkazov:

- [1] STAŇKOVÁ, H., MAŠEK, B., MEYER L. W. The Influence of the Incremental Deformation Intensity on the Microstructure Development. In *7th Int. Conference on Production Engineering and Design for Development*, PEDD 7, 2006, Cairo, Egypt. ISBN 12-7340-49-8
- [2] MAŠEK, B., STAŇKOVÁ, H., NOVÝ, Z., MEYER, L. W. Development of new incremental forming strategies for low-alloyed TRIP steels. In *8th Int. Conference on Technology of Plasticity*, ICTP 2005, Verona, 2005, I, ISBN 88-87331-74-X
- [3] MAŠEK, B., STAŇKOVÁ, H., MEYER, L. W., NOVÝ, Z., KLÍBR, J. Structure refinement in TRIP steel by means of intensive incremental deformation for rotary spin extrusion. In *International Conference Asia Steel 06*, 9. - 11. 5. 2006, Fukuoka, Japan.
- [4] STAŇKOVÁ, H. *Inkrementální deformace při termomechanickém zpracování oceli s TRIP efektem*. [Diplomová práca]. Plzeň: FS, Západočeská univerzita, 2003.
- [5] KUPEC, S. *Vliv termomechanického zpracování na únavové vlastnosti* [Diplomová práca]. Plzeň : FS, Západočeská univerzita, 2003.
- [6] MAŠEK, B., MEYER, L. W., NOVÝ, Z. Improving of Mechanical Properties of 38MnSiVS5 Steel by Multiple Deformation. In *Int. Conference on Production Engineering and Design for Development*, PEDD 6, Egypt, Cairo Aim Shams University, 2002.
- [7] Ansys Theoretical Manual, Release 10.0., SAS IP, Inc., 2005.
- [8] NOVÁK, P. *Základy elektrotepelnej techniky*. Košice : Mercury-Smekal, 2001.
- [9] INCROPERA, F. P., DeWITT, D. P. *Fundamentals of heat and mass transfer*. New York: J. Wiley and Sons, 1996.
- [10] TARABA, B., BEHÚLOVÁ, M., KRAVÁRIKOVÁ, H. *Mechanika tekutín. Termomechanika*. Bratislava: Vydavateľstvo STU, 2002.
- [11] TARABA, B. *Numerická analýza teplotných polí a jej aplikácia vo vybraných technologických procesoch*. Habilitačná práca. TU Košice, 2003.