

TEPELNÉ CHARAKTERISTIKY VYBRANÝCH KALIACICH PROSTREDÍ

THERMAL CHARACTERISTICS OF SELECTED QUENCHING MEDIA

Bohumil TARABA

Autor: **doc. Ing. Bohumil Taraba, PhD.**
Pracovisko: **Ústav výrobných systémov a aplikovanej mechaniky, Katedra aplikovanej
mechaniky, Materiálovotechnologická fakulta STU**
Adresa: **Paulínska 16, 917 24 Trnava, Slovensko**
Tel.: **0918 646 035**
E-mail: **bohumil.taraba@stuba.sk**

Abstract

The article is focused on the heat treatment and cooling properties of quenching fluids. Through experiments and statistical data handling, the cooling curves for selected fluids: quenching oils (Isomax 166, Isorapid 277 HM) and distilled water were obtained. The experimental method was based on the IVF quench test, ISO 9950. The cooling media were unagitated with steady-state temperature of 50 °C. The methodology of the solution of inverse heat conduction problem was used for quantification of the cooling properties (cooling rate, heat transfer coefficient, heat flux, heat transfer equivalent and hardening power). The interpretation computer code was ANSYS. The numerical analyses were transient and nonlinear.

Článok je orientovaný na problematiku tepelného spracovania s ohľadom na chladiace vlastnosti kaliacich médií. Cestou experimentálnych meraní teplôt a ich štatistického spracovania boli získané chladiace krivky pre vybrané prostredia: kaliace oleje (Isomax 166, Isorapid 277 HM) a vodu. Experimentálna metóda bola v súlade s kaliacim testom IVF podľa normy ISO 9950. Ochladzovacie prostredia boli pokojné a mali stálu teplotu 50 °C. Aplikovaním metodiky inverzno-numericke-korelačnej metódy (INK) boli kvantifikované funkčné závislosti koeficienta prestupu tepla konvekciou a hustoty tepelného toku od teploty povrchu ochladzovanej sondy. Súčasťou článku sú rýchlosti ochladzovania, ekvivalenty prenosu tepla a koeficienty ochladzovania „hardening power“ pre kaliace oleje.

Key words

quenching, cooling curve, cooling rate, heat transfer coefficient

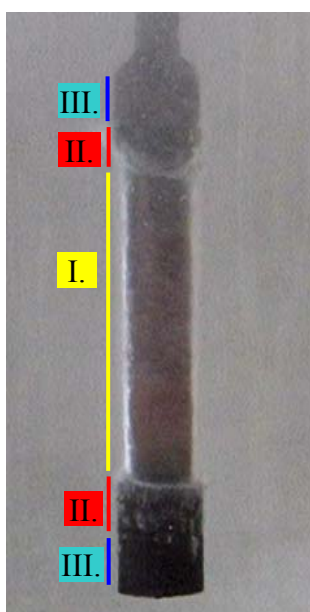
kalenie, ochladzovacia krivka, rýchlosť ochladzovania, koeficient prestupu tepla

Úvod

Tepelné spracovanie ocelí je mnohparametrový proces, ktorého cieľom je kvalitatívna zmena štruktúry materiálu. Jedným z postupov pri tepelnom spracovaní je kalenie, kedy sa vyžaduje rýchle ochladenie súčiastky z kaliacej teploty vo vhodne zvolenom ochladzovacom prostredí. Požiadavky praxe na vlastnosti zakalených súčiastok vyžadujú poznanie kvalitatívnych a kvantitatívnych vlastností použitých ochladzovacích médií. Ochladzovacie krivky sú základom pre posudzovanie tepelných vlastností chladiacich prostredí. Medzinárodná normalizovaná skúška, ktorá sa využíva pre experimentálne získanie chladiacej krivky je známa ako Wolfsonova skúška a je normalizovaná normou ISO 9950 [1]. Nasledovným spracovaním chladiacej krivky je možné určiť tepelné parametre ochladzovacieho prostredia: rýchlosť ochladzovania, kombinovaný koeficient prestupu tepla a hustotu tepelného toku z povrchu sondy do kaliaceho prostredia. Získané parametre sú použiteľné pre hodnotenie účinku kaliaceho prostredia na ochladzovanú súčiastku a vzhľadom na aktuálne trendy v inžinierskom prístupe k počítačovým modelovaniam technologickým procesom s cieľom aj k predikovaní nestacionárnych teplotných polí a s nimi spojených napäťovo-deformačných stavov v telese kalenej súčiastky.

1. Teoretická báza

Charakter procesu je ochladzovanie sondy so začiatočnou teplotou vyššou (kaliacou teplotou) ako je teplota varu ochladzovacej tekutiny. Ochladzovacia tekutina (pokojná alebo vírená) má teplotu nižšia ako je jej teplota varu. Po ponorení ohriatej sondy do tekutiny nastáva vytvorenie plynného obalu. Pri ochladzovaní v olejoch vznikajú medzi povrchom sondy a neovplyvneným olejom spaliny. Pri ochladzovaní vo vode vzniká prehriata vodná para (obr. 1, I). Dominantným spôsobom prestupu tepla vo fáze I je žiarenie. Z teoretického hľadiska je prenos tepla v plynnom obale opísaný Stefanovým-Boltzmanovým zákonom [2]. S postupným znižovaním teploty povrchu zanikajú podmienky pre tvorbu plynného obalu a začína var chladiacej tekutiny (obr. 1, II). Var tekutiny prechádza najprv fázou blanového varu, potom rozvinutým bublinkovým varom a zaniká počas nerozvinutého bublinkového varu. Známe sú formulácie pre jednotlivé fázy varu [3].



Obr. 1. Fázy ochladzovania valcovej sondy vo vode s teplotou 60 °C

Po ukončení varu prechádza proces ochladzovania do konvektívneho spôsobu odvádzania tepla z povrchu sondy a možno ho charakterizovať ako voľnú konvekciu do neobmedzeného priestoru bez fázovej premeny (obr. 1, III). V odbornej literatúre je dostatok matematických modelov (kritériálnych rovníc), prostredníctvom ktorých je možné vypočítať strednú hodnotu koeficienta prestupu tepla konvekciou z povrchu sondy do chladiaceho prostredia [2, 3, 4]. Na originálnom ilustračnom obrázku 1 (z experimentov pri teplote vody 60 °C) sú ukázané jednotlivé fázy procesu ochladzovania valcovej ocelevej sondy s priemerom 19 mm a dĺžkou 110 mm vo vode v čase 11 s po zvislom ponorení do pokojnej vody. Začiatková teplota sondy bola 850 °C. Z obr. 1 sú zrejmé optické vlastnosti obalu s prehriatou parou okolo povrchu sondy, kedy sa priemer sondy javí menší ako je v skutočnosti.

Zložitosť prenosu tepla v opísanom prípade je možné nahradiť závislosťou kombinovaného koeficienta prestupu tepla konvekciou od teploty povrchu sondy $h_{\text{komb}}(T_s)$ [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$]. Pre valcovú sondu s dostatočnou dĺžkou sa hľadaná závislosť $h_{\text{komb}}(T_s)$ určí z rovnosti hustôt tepelných tokov na plášti v čase t_i (1). Fourierov zákon vedenia tepla (ľavá strana rovnice (1)) udáva hustotu tepelného toku, ktorú odvádza ochladzovacie prostredie konvekciou (Newtonov zákon) [2]:

$$-\lambda(T)\text{grad}T(r)\Big|_{t_i} = q(T_s)\Big|_{t_i} = h_{\text{komb}}(T_s)[T_s(t_i) - T_r], \quad [\text{W}\cdot\text{m}^{-2}] \quad (1)$$

kde $\lambda(T)$ je koeficient tepelnej vodivosti [$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$], $h_{\text{komb}}(T_s)$ je kombinovaný koeficient prestupu tepla [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$], $T_s(t_i)$ teplota povrchu steny [°C] a T_r je teplota neovplyvneného okolitého prostredia [°C], r je súradnica polomeru v cylindrickom súradnicovom systéme. Ďalším parametrom ochladzovacieho média je poznanie priebehu hustoty tepelného toku, ktorú je médium schopné odvieť z povrchu telesa $q(T_s)$ [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$].

Pre posudzovanie vplyvu chladiaceho média na vlastnosti kaleného telesa pre potreby tepelného spracovania existujú viaceré metódy a prostriedky pre uľahčenie testovania kaliacich prostredí a štandardizáciu kaliacich prostredí. Jednou z metód je tzv. „ekvivalent prenosu tepla“ H [m^{-1}], ktorú zaviedol Grossmann [5] pre hodnotenie ochladzovacej schopnosti kaliacich médií. Hodnota H je definovaná vzťahom

$$H = \frac{\bar{h}}{2\bar{\lambda}}, \quad [\text{m}^{-1}] \quad (2)$$

kde \bar{h} [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$] je stredná hodnota koeficienta prestupu tepla a $\bar{\lambda}$ [$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$] je stredná hodnota koeficienta tepelnej vodivosti materiálu počas celého procesu ochladzovania. Ak sa uvažuje hodnotenie chladiacich vlastností prostredí podľa Grossmanna v relatívnom vzťahu k pokojnej vode (voda = 1,0), potom menej intenzívne chladiace prostriedky majú hodnotu nižšiu ako 1,0 a viac intenzívne prostredia vyššiu ako 1,0. Hodnota H neberie do úvahy, alebo len v malej miere fakt, že koeficient prestupu tepla a koeficient tepelnej vodivosti sa menia pri rôznych teplotách. Ochladzovacie prostredie s vyššou hodnotou H preto nespôsobí v procesoch kalenia vždy vyššiu tvrdosť.

Z metód posudzovania chladiacich účinkov prostredí bola vybraná metóda IVF hardening power, HP (IVF = The Swedish Institute of Production Engineering Research) [6]. Vzťah pre výpočet hodnoty HP má tvar:

$$HP = k_1 + k_2 T_{VP} + k_3 CR - k_4 T_{CP}, \quad [-] \quad (3)$$

kde T_{VP} [°C] je Leidenfrostova teplota (teplota prechodu medzi plynnou fázou a fázou varu), CR [K.s⁻¹] je stredná rýchlosť ochladzovania medzi teplotami 500 a 600 °C, T_{CP} [°C] je teplota prechodu medzi fázou varu a voľnou konvekciou, k_1 , k_2 , k_3 a k_4 sú konštanty závislé od materiálu súčiastky a použitého ochladzovacieho oleja. Rozmer HP sa neuvažuje. Pre koeficienty z (3) podľa [6] platí: $k_1 = 91,5$; $k_2 = 1,34$; $k_3 = 10,88$ a $k_4 = 3,85$.

2. Charakteristiky použitých kaliacich olejov [7]

Isomax 166 je intenzívny kaliaci olej s nízkou väzkosťou, ktorý sa používa predovšetkým pre kalenie nelegovaných, legovaných, termicky upravených a cementovaných ocelí. Umožňuje dosiahnuť vysoký stupeň prekalenia i u veľkých komponentov. Je odolný voči odparovaniu. Odporúčaný interval pracovných teplôt je 40 až 70 °C, maximálna použiteľná teplota 130 °C, koeficient kinematickej viskozity pri teplote 40 °C je $12,5 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$.

Isorapid 277 HM je olej s krátkou fázou plynového obalu, čo spôsobuje zníženie vzniku nadmerných deformácií. Vhodný je pre tepelné spracovanie súčiastok pohonných mechanizmov (automobilový priemysel). Je odolný voči odparovaniu. Odporúčaný interval pracovných teplôt je 50 až 80 °C, maximálna použiteľná teplota 130 °C, koeficient kinematickej viskozity pri teplote 40 °C je $25 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$.

3. Podmienky experimentu

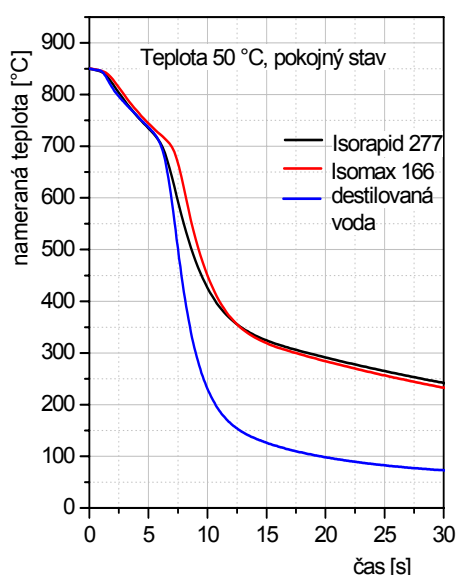
Experimentálne zariadenie pozostávalo z elektrickej odporovej muflovej pece typu LM 212.10, skúšobnej valcovej sondy s priemerom 12,5 mm a výškou 60 mm z materiálu STN 41 7255, olejov: Isomax 166, Isorapid 277, destilovanej vody a zariadenia NI USB 9211 [8] pre digitálny záznam meranej teploty. Súbor meraní tvorilo šesť meraní teplôt v ťažisku sondy pre každé prostredie prostredníctvom púzdrovaného termočlánku 304 SS typu K s priemerom puzdra 1,5 mm a s frekvenciou záznamu teploty 5-krát za sekundu. Dokonalý tepelný kontakt medzi telesom a termočlánkom bol dosiahnutý mikrozvarom. Geometrická a začiatočná podmienka experimentu bola odvodená z Wolfsonovho IVF kaliaceho testu [1]. Začiatočná teplota sondy bola 850 ± 5 °C a do pokojných prostredí so stálou teplotou 50 ± 2 °C bola ponáraná vo zvislom smere.

4. Numerická simulácia

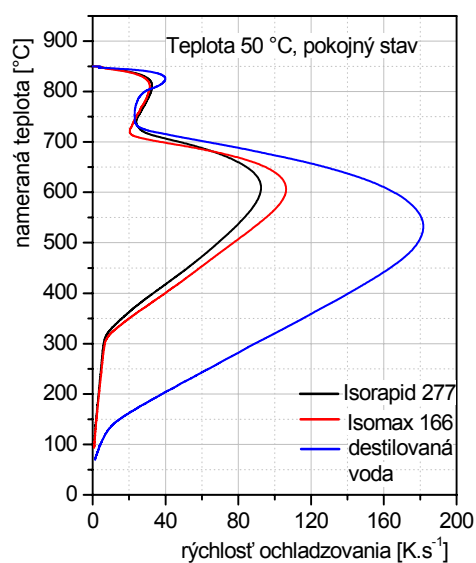
Numerická simulácia bola využitá na riešenie nelineárnej tepelnej úlohy pre vzniknutý inverzný problém prenosu energie z ochladzovanej sondy do okolitého kvapalného prostredia [9]. Interpretačným programom numerickej simulácie bol inžiniersko-vedecký program ANSYS [10]. Simulačný model bol dvojrozmerný a geometricky nahrádzal polovicu valcovej sondy s rovinou symetrie kolmej na os rotácie v mieste ťažiska. Použité boli osovymetrické elementy s kvadratickou báзовou funkciou. Výpočtové procedúry boli nestacionárne a nelineárne. Termofyzikálne vlastnosti materiálu sondy boli získané z viacerých zdrojov [11, 12] a opublikované boli v literatúre [13].

5. Získané výsledky a vyhodnotenie

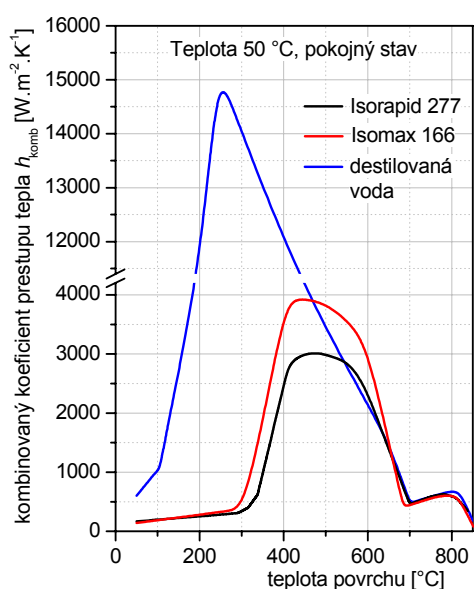
Výsledky zo štatisticky spracovaných meraní chladiacich kriviek sú na obr. 2. Vzťah rýchlostí ochladzovania od teplôt v ťažisku sondy pre testované oleje a vodu sú zobrazené na obr. 3. Obr. 4 zobrazuje závislosti kombinovaných koeficientov prestupu tepla od teploty povrchu ochladzovanej sondy, ktoré boli získané prostredníctvom inverzno-numericke-korelačnej metódy (INK) [14] s využitím numerickej simulácie. Na obr. 5 sú ukázané závislosti hustoty tepelného toku odvodňovaného do ochladzovacieho prostredia od teploty povrchu.



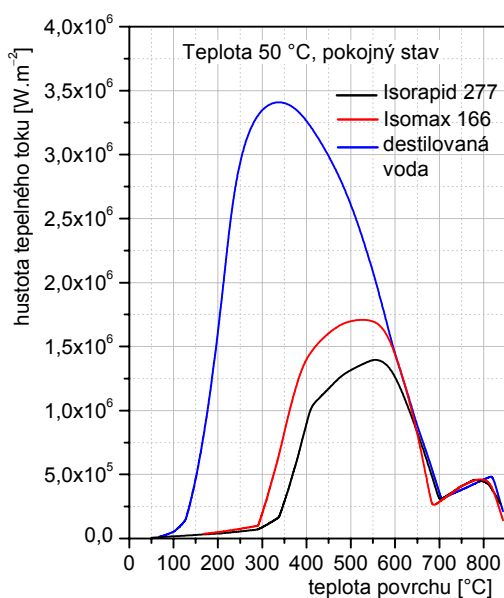
Obr. 2. Chladiace krivky



Obr. 3. Rýchlosti ochladzovania



Obr. 4. Závislosť $h_{komb}(T_s)$ od teploty povrchu sondy



Obr. 5. Závislosť hustoty tepelného toku od teploty povrchu sondy

6. Vyhodnotenie získaných výsledkov

Ochladzovanie sondy v oleji Isomax 166. Plynový obal okolo sondy sa vytvára v intervale povrchových teplôt 850 až 690 °C. Var oleja Isomax 166 existuje medzi teplotami povrchu 690 až 290 °C. Najvyššia hodnota kombinovaného koeficienta prestupu tepla je $3920 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$ pri teplote povrchu 445 °C. Pri nižšej teplote povrchu ako 290 °C je energia z povrchu sondy do oleja odvádzaná voľnou konvekciou. Maximálna hodnota rýchlosti ochladzovania v ťažisku sondy je 106 K.s^{-1} pri nameranej teplote 606 °C. Numerická analýza ukázala, že najvyššiu hustotu tepelného toku odvádzá Isomax 166 pri teplote povrchu 531 °C a má hodnotu $1,71 \text{ MW.m}^{-2}$.

Ochladzovanie sondy v oleji Isorapid 277 HM. Plynový obal okolo sondy sa vytvára v intervale povrchových teplôt 850 až 703 °C. Var oleja Isorapid 277 HM existuje medzi teplotami povrchu 703 až 321 °C. Najvyššia hodnota kombinovaného koeficienta prestupu tepla je $3011 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$ pri teplote povrchu 473 °C. Pri nižšej teplote povrchu ako 321 °C je energia z povrchu sondy do oleja odvádzaná voľnou konvekciou. Maximálna hodnota rýchlosti ochladzovania v ťažisku sondy je $92,2 \text{ K.s}^{-1}$ pri nameranej teplote 608 °C. Numerická analýza ukázala, že najvyššiu hustotu tepelného toku odvádzá Isorapid 277 HM pri teplote povrchu 555 °C a má hodnotu $1,40 \text{ MW.m}^{-2}$.

Ochladzovanie sondy vo vode. Obal prehriatej vodnej pary okolo sondy sa vytvoril v intervale povrchových teplôt 850 až 706 °C. Var vody v procese ochladzovania existoval medzi teplotami povrchu 702 až 107 °C. Najvyššia vypočítaná hodnota kombinovaného koeficienta prestupu tepla je $14800 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$ pri teplote povrchu 256 °C. Pri nižšej teplote povrchu ako 107 °C je energia z povrchu sondy do vody odvádzaná voľnou konvekciou. Maximálna hodnota rýchlosti ochladzovania v ťažisku sondy je 182 K.s^{-1} pri teplote 531 °C. Najvyššiu hustotu tepelného toku odvádzá voda pri teplote povrchu 339 °C a má hodnotu $3,41 \text{ MW.m}^{-2}$.

Ekvivalenty prenosu tepla H boli vypočítané podľa vzťahu (2). Stredné hodnoty \bar{h} boli určené integráciou plochy pod krivkami z obr. 4 a vzťahnuté na interval pracovných teplôt 850 °C až 50 °C. Veličiny potrebné pre kvantifikovanie hodnoty HP boli odčítané z obr. 3. Vypočítané hodnoty H a HP sú pre testované prostredia uvedené v tab. 1. Pre ochladzovanie vo vode nie je možné vyhodnocovať hodnotu HP podľa (3).

HODNOTY H A HP PRE OLEJE ISOMAX 166, ISORAPID 277 HM A VODU Tabuľka 1

Ochladzovacie prostredie s teplotou 50 °C								
	\bar{h} [W.m ⁻² .K ⁻¹]	$\bar{\lambda}$ [W.m ⁻¹ .K ⁻¹]	H [m ⁻¹]	<i>Pomer k vode</i>	T_{VP} [°C]	T_{CP} [°C]	CR [K/s]	HP [-]
Isomax 166	1529	20,9	36,6	0,30	721	309	91,5	863
Isorapid 277 HM	1247	20,9	29,8	0,22	740	314	80,4	750
voda	5567	20,9	133,2	1,00	-	-	-	-

7. Záver

Porovnanie ochladzovacích vlastností olejov Isomax 166, Isorapid 277 HM a vody ukázalo na kvalitatívny rozdiel v chladiacom účinku. Pokým var oleja Isomax 166 končí nad teplotou štartu martenzitickej premeny pre väčšinu kalených materiálov, voda je ešte v stave varu a odvádza vzhľadom na olej veľké množstvo tepla z povrchu súčiastky. Uvedená vlastnosť vody je zrejماً z obr. 4. Dôsledkom účinku vody bude vyššia úroveň napätovo-deformačných stavov spracovávaných súčiastok kalením.

Dôveryhodnosť získaných parametrov ochladzovania bola posudzovaná vzhľadom na ekvivalenty prenosu tepla podľa Grossmanna a hodnôt *HP*-hardening power, tab. 1. Olej Isomax 166 má ekvivalent prenosu tepla na úrovni 30 % a olej Isorapid 277 na úrovni 22 % z ekvivalentu prenosu tepla vody pri teplote testovaných médií 50 °C. Chladiaca schopnosť oleja Isorapid 166 je určená hodnotou *HP* = 863. Pre olej Isorapid 277 HM je vypočítaná *HP* = 750. Po zvážení hodnôt zo zdrojov [1, 5, 13] a porovnaní s vyššie uvedenými výsledkami je možné prijať záver o akceptovateľnosti uvedených výsledkov pre chladiace vlastnosti vybraných médií.

Získané závislosti kombinovaného koeficienta prestupu tepla a hustoty tepelného toku od teploty povrchu súčiastky pre pokojné oleje Isomax 166, Isorapid 277 HM a vodu s teplotou 50 °C je možné aplikovať ako okrajovú podmienku pri teplotno-napätových numerických analýzach pre zvislé steny.

POĎAKOVANIE

Práca bola podporovaná grantovou agentúrou MŠ SR a SAV VEGA 1/2111/05, VEGA 1/2073/05 a VEGA 1/2101/05.

Zoznam bibliografických odkazov:

- [1] BODIN, J., SEGERRBERG, S.: *Measurement and Evaluation of the Power of Quenching Media for Hardening*. Heat Treatment of Metals, 1993, p. 15-23
- [2] TARABA B., BEHÚLOVÁ M., KRAVÁRIKOVÁ H.: *Mechanika tekutín, Termomechanika*, ES STU, STU v Bratislave, 2004. - 241 s. - ISBN 80-227-2041-0
- [3] INCROPERA, F., P., DEWITT, D.: *Fundamentals of heat and mass transfer*. John Wiley & Sons. New York, 1996. ISBN 0-471-30460-3
- [4] KUTATELADZE, S. S., BORIŠANSKIJ, V., M. *Příručka sdílení tepla*. Praha: SNTL, 1962
- [5] Dostupné na internete: <<http://www.mechanicalengineering.cc/mechanical-engineering-archives/11-Quenching-of-Steel.Cooling-Curve-Analysis,Distortion-and-Cracking.html>> 2007-10-10
- [6] Dostupné na internete: <http://www.ivf.se/upload/pdf-filer/produkter_tjanster/leaflet-smartquench.pdf> 2007-10-10
- [7] Dostupné na internete: <www.petrofer.com.ua/content/hardening_compound/2_1.htm>, 2007-10-10
- [8] Dostupné na internete: <<http://sine.ni.com/nips/cds/view/p/lang/en/nid/13880>> 2007-10-10

- [9] ALIFANOV, O, M.: *Inverse Heat Transfer Problems*, Springer-Verlag, Berlin, New York, 1994
- [10] ANSYS THEORETICAL MANUAL, Release 10.0, SAS IP, Inc., 2006.
- [11] RADAJ D.: *Schweissprozesssimulation, Grundlagen und Anwendungen*, Verl. für Schweissen und Verwandte Verfahren, DVS-Verl., 1999.
- [12] Dostupné na internete: <<http://www.matweb.com/search/GetSubcat.asp>>, 2007-10-10
- [13] TARABA, B., LAŠČEK, M.: *Vplyv teploty kaliaceho oleja na energetický stav tepelne spracovávanej súčiastky. Quenching oil temperature effect on energy state of the part heat treatment. Acta Mechanica Slovaca. - ISSN 1335-2393. - Roč. 10, č. 1 (2006), s. 567-572*
- [14] TARABA, B.: *Thermálna analýza kaliaceho testu typu IVF*. In Materials Science and Technology, 3, 2003. ISSN 1335 9053, Dostupné na internete: >http://www.mtf.stuba.sk/buxus/generate_page.php?page_id=1696>, 2007-10-10
- [15] BEHÚLOVÁ, M., MAŠEK, B., MEYER, L.W.: *Thermal analysis of internally cooled spike for the process of rotary spin extrusion*. Bratislava, In: CO-MAT-TECH 2005: Proceedings/ International Scientific Conference, 13th, Trnava, Slovak Republic, 20-21 October 2005. -: STU v Bratislave, 2005. - ISBN 80-227-2286-3. - S. 71-81