

## VPLYV TEPLoty KALIACEHO OLEJA NA ENERGETICKÝ STAV TEPELNE SPRACOVÁVANEJ SÚČIASTKY

### QUENCHING OIL TEMPERATURE EFFECT ON ENERGY STATE OF THE PART HEAT TREATMENT

Bohumil TARABA<sup>1</sup>, Milan LAŠČEK<sup>1</sup>

#### *Abstrakt*

Príspevok je venovaný problematike ochladzovania súčiastok v pokojnom kaliacom oleji Isomax 166. Prostredníctvom experimentálnych meraní časových priebehov teploty v ťažisku valcovej sondy a riešením inverzného problému vedenia tepla iteračno-numericko-korelačnou metódou (INK) sú kvantifikované funkčné závislosti koeficienta prestupu tepla od teploty povrchu sondy pre vybrané teploty oleja Isomax 166. Aplikáciou získaných funkčných závislostí koeficienta prestupu tepla na simulačný model sondy s nelineárnymi termofyzikálnymi a mechanickými materiálovými vlastnosťami je sledovaný vplyv teploty oleja na energetický stav ochladzovanej sondy a po jej vychladnutí. Interpretáčnym prostriedkom riešenia je programový súbor ANSYS. Výpočtové procedúry sú tepelné a štrukturálne, nelineárne a nestacionárne.

**Kľúčové slová:** kaliaci olej, chladiaca krivka, prechod tepla, rýchlosť ochladzovania, numerická simulácia, vnútorná energia plastickej deformácie.

#### *Abstract*

The article presents the partial results of the research of Isomax 166 quench-oil cooling properties. The influence of the cooling media temperature on the heat transfer from test probe into still quench-oil was searched. The time-dependent experimental temperatures were processed by inverse the heat transport through the numerical simulation. The obtained combined heat transfer coefficient dependences of the part surface temperature are the loads for structural simulation model with non-linear material properties. The plastic work after the cooling are the article results.

**Keywords:** quenching oil, quench curve, heat transfer, cooling rate, numerical simulation, plastic work per volume

## ÚVOD

Tepelné spracovanie kovov je mnohoparametrový proces. Výber vhodných parametrov predurčuje dosiahnutie požadovaných vlastností spracovávanej súčiastky. Výber ochladzovacieho média, voľba jeho teploty a stavu (pokojný, vírený) majú rozhodujúci význam.

Jedným z ochladzovacích médií je kaliaci olej Isomax 166. Predikcia správania sa spracovávanej súčiastky počas ochladzovania je možná len v prípadoch, ak sú dostatočne známe podmienky jednoznačnosti procesu. Aplikácia numerickej simulácie pre procesy ochladzovania vyžaduje kvantitatívne poznanie okrajovej podmienky prenosu tepla na povrchu súčiastky.

<sup>1</sup> Doc. Ing. Bohumil TARABA, PhD., Ing. Milan LAŠČEK, KAM, MTF STU, Trnava,  
[bohumil.taraba@stuba.sk](mailto:bohumil.taraba@stuba.sk), [milan.lascek@stuba.sk](mailto:milan.lascek@stuba.sk)

Lektoroval: prof. Ing. Marián BURŠÁK, CSc., KNoM, HF TU v Košiciach, [marian.bursak@tuke.sk](mailto:marian.bursak@tuke.sk)

Spoločne s ďalšími podmienkami jednoznačnosti procesu je potom možné prostredníctvom simulačného modelu formou numerického experimentu skúmať účinok jednotlivých parametrov procesu tepelného spracovania na okamžitý a konečný stav súčiastky. Príspevok prezentuje metodológiu kvantifikovania ochladzovacieho účinku pokojného oleja pri vybraných teplotách [1, 2] Isomax 166 a ich vplyv na energetický stav súčiastky po vychladnutí na teplotu oleja.

## OPIS EXPERIMENTÁLNYCH METÓD A POUŽITÉHO MATERIÁLU

### *Charakteristika oleja*

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, kinematická viskozita pri teplote 40 °C je  $12,5 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$  [3].

### *Podmienky experimentu*

Experimentálne zariadenie pozostávalo z elektrickej odporovej pece typu LM 212.10, skúšobnej valcovej sondy z materiálu STN 41 7240, pokojného oleja Isomax 166 a zariadenia NI USB 9211 pre digitálny záznam meranej teploty. Každý súbor meraní pozostával zo šiestich meraní teplôt prostredníctvom puzdruvaného termočlánku 304 SS typu K s priemerom puzdra 1,5 mm a s frekvenciou záznamu 5 Hz. Dokonalý tepelný kontakt medzi telesom a termočlánkom bol dosiahnutý mikrozvarom. Geometrická a začiatočná podmienka experimentu bola odvodená z Wolfsonovho kaliaceho testu [1]. Priemer valcovej sondy bol  $2r = 12,5 \text{ mm}$ , výška  $z = 60 \text{ mm}$  a začiatočná teplota sondy bola 850 °C. Pre chladiaci olej Isomax 166 bolo vybraných päť teplôt: 0, 30, 60, 90 a 120 °C. Počas meraní bola teplota oleja udržiavaná na jednej z uvedených hodnôt. Jednotlivé súbory meraní boli štatisticky vyhodnotené a výsledkom boli časové zmeny teplôt pri ochladzovaní (mediány teplôt), ktoré tvorili základ pre riešenie inverznej úlohy vedenia tepla inverzno-numericko-korelačnou (INK) metódou [4] a výpočtu rýchlosti ochladzovania.

### *Teoretická báza úlohy*

Prestup tepla z valcovej sondy do chladiaceho oleja je kombináciou žiarenia, varu v nedohriatej tekutine, konvektívneho prenosu energie na strane oleja a nestacionárneho vedenia tepla v sonde. Nestacionárne teplotné pole v ochladzovanej sonde je opísané Fourierovou-Kirchhoffovou diferenciálnou rovnicou vedenia tepla pre cylindrický súradnicový systém, ktorá je riešená metódou konečných prvkov pri definovaní podmienok jednoznačnosti. Určovaný bol kombinovaný koeficient prestupu tepla konvekciou  $h_{\text{komb}}$  ako funkcia teploty povrchu sondy pre každú teplotu oleja. Zásadnou je podmienka rovnosti hustôt tepelných tokov na povrchu sondy v čase  $t_i$

$$-\lambda(\vartheta) \text{grad } \vartheta(r, z) \Big|_{t_i} = q_{t_i} = h_{\text{komb}}(\vartheta_s) [\vartheta_s(t_i) - \vartheta_r], \quad [\text{W} \cdot \text{m}^{-2}] \quad (1)$$

kde  $\lambda(\vartheta)$  je koeficient tepelnej vodivosti [ $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ],  $h_{\text{komb}}(\vartheta_s)$  je kombinovaný koeficient prestupu tepla [ $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ ],  $\vartheta_s(t_i)$  teplota povrchu steny [°C] v čase  $t_i$  a  $\vartheta_r$  je teplota neovplyvneného okolitého prostredia (chladiaceho oleja) [°C].

Ďalšie predpoklady tepelnej úlohy: materiál skúšobnej sondy je izotropický a jeho termofyzikálne vlastnosti sú závislé od teploty  $\lambda(\vartheta)$ ,  $\rho(\vartheta)$ ,  $c(\vartheta)$ , proces ochladzovania je izobarický, hmotnostná tepelná kapacita  $c(\vartheta) = c_p(\vartheta)$ , teplota chladiaceho oleja je počas procesu konštantná,  $\vartheta_r \neq f(t)$ , zdroj energie v jednotke objemu za jednotku času je nulový,  $\dot{q}_v = 0 \text{ W} \cdot \text{m}^{-3}$ .

Uvažovaný materiálový model pre štruktúrnu úlohu je elasto-plastický s bilineárnym kinematickým spevnením. Kritérium von Misesa pre vznik plastických deformácií je dané prahovou funkciou [5]

$$F(\sigma_M, \vartheta) = f(\sigma_M, \vartheta) - R_e(\vartheta) = 0, \quad [\text{Pa}] \quad (2)$$

kde  $\sigma_M$  je Misesovo ekvivalentné napätie [Pa],  $\vartheta$  teplota [°C] a  $R_e$  je medza sklzu materiálu [Pa]. Prírastok vnútornej energie plastických deformácií je definovaný podľa [6] vzťahom

$$dW_p = \sigma_{ij} d\varepsilon_{ij}^p, \quad [\text{J.m}^{-3}] \quad (3)$$

kde  $\sigma_{ij}$  je tenzor napätosti [Pa] a  $d\varepsilon_{ij}^p$  je prírastok plastickej deformácie [-].

### Numerická simulácia

Interpretačným programom numerickej simulácie bol inžiniersko-vedecký program ANSYS. Simulačné modely boli dvojrozmerné. Geometricky nahrádzali polovicu valcovej sondy s rovinou symetrie kolmej na os rotácie v mieste ťažiska. Použité boli osovysymetrické elementy s kvadratickou báзовou funkciou. Výpočtové procedúry boli nestacionárne a nelineárne. Termofyzikálne a mechanické vlastnosti materiálu sondy tvoria podmienku jednoznačnosti procesu, ktorá má najväčší účinok na výsledky. Preto boli získané z viacerých zdrojov [7, 8, 9] a uvedené sú v tabuľke 1.

**Hodnoty termofyzikálnych a mechanických vlastností materiálu STN 41 7240**      **Tabuľka 1**

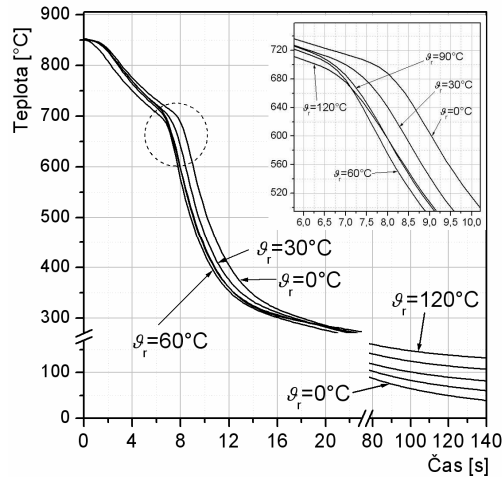
teplota $\vartheta$ [°C]	koeficient tepelnej vodivosti $\lambda$ [W.m <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> ]	hmotnostná tepelná kapacita $c$ [J.kg <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> ]	objemov á hustota $\rho$ [kg.m <sup>-3</sup> ]	modul pružnosti $E$ [MPa]	koeficient dĺžkovej teplotnej rozťažnosti $\alpha_1$ [K <sup>-1</sup> ]	medza sklzu $R_e$ [MPa]	Poissonovo číslo $\nu$ [-]	tangenciáln y modul $E_t$ [MPa]
0	14,8	455	7940	200000	16,8	235	0,3	1185
100	15,8	475	7911	195000	17,2	233	0,3	1175
200	17,0	495	7871	188000	17,6	230	0,3	1160
300	18,4	508	7830	181000	17,8	222	0,3	1080
400	20,0	525	7787	172000	18,0	206	0,3	950
500	22,0	550	7745	165000	18,3	174	0,3	812
600	24,0	572	7703	157000	18,5	137	0,3	660
700	25,7	602	7662	147000	18,8	94	0,3	470
800	27,5	620	7620	135000	19,0	55	0,3	250
900	29,4	630	7578	100000	19,2	36	0,3	185

## VÝSLEDKY A DISKUSIA DOSIAHNUTÝCH VÝSLEDKOV

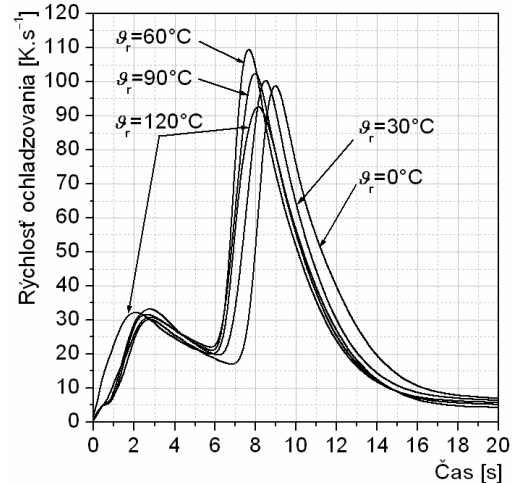
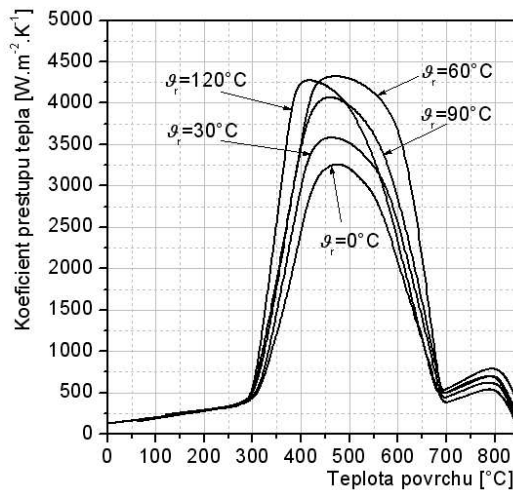
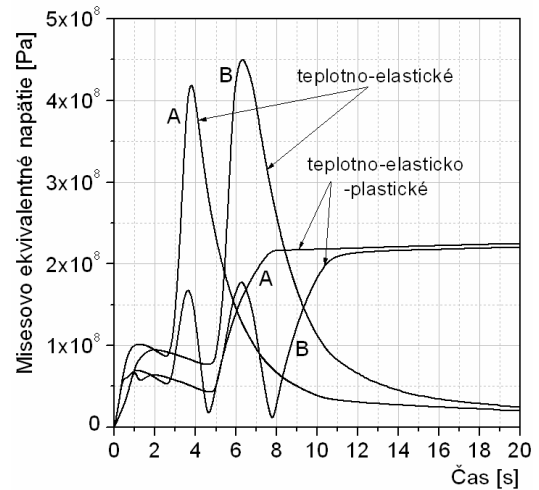
Mediány experimentálnych výsledkov časových priebehov teplôt pri ochladzovaní sondy pri vybraných teplotách oleja a časovom intervale 0 až 140 s sú uvedené na obr. 1. Obrázok 2 ukazuje rýchlosti ochladzovania, ktoré boli získané deriváciou podľa času jednotlivých priebehov teplôt z obr. 1. Z dôvodu prehľadnosti sú rýchlosti ochladzovania uvádzané pre čas 0 až 20 s.

Závislosti koeficienta prestupu tepla od teploty povrchu sondy  $h_{\text{komb}}(\vartheta_s)$  pre vybrané teploty pokojného oleja Isomax 166 sú ukázané na obr. 3. Závislosti  $h_{\text{komb}}(\vartheta_s)$  boli získané metódou INK, pri ktorej boli dosiahnuté hodnoty koeficientov korelácie medzi nameranými a vypočítanými priebehmi teplôt na úrovni 0,999 [10].

Nelineárny simulačný model sondy bol zaťažovaný jednotlivými priebehmi  $h_{\text{komb}}(\vartheta_s)$  z obr.3. Výsledkom nestacionárnych tepelných a štruktúrnych výpočtov boli teplotné a teplotno-napätovo-deformačné polia, z ktorých sú uvedené na obr. 4 priebehy teplotno-elastických a teplotno-elasticko-plastických Misesových ekvivalentných napätí vo vybraných bodoch sondy pre teplotu oleja 60 °C.



Obr. 1 Mediány nameraných teplôt [°C]

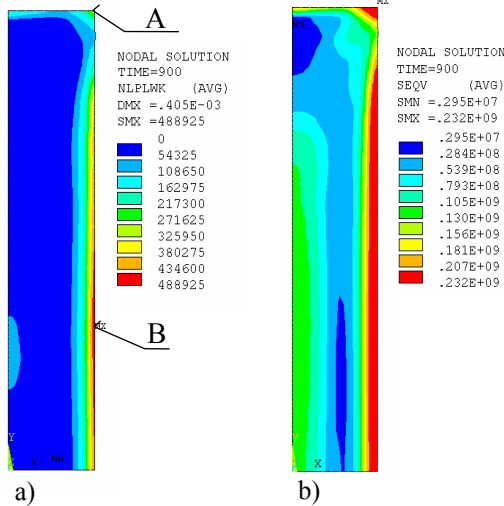
Obr. 2 Rýchlosti ochladzovania [K.s<sup>-1</sup>]Obr. 3 Závislosti  $h_{komb}(g_s)$ , [W.m<sup>-2</sup>.K<sup>-1</sup>]Obr. 4 Priebehy teplotno-elastických a teplotno-elasticko-plastických Misesových napätí pre  $g_r = 60$  °C [Pa]

Obr.5 dokumentuje rozloženie vnútornej energie plastických deformácií a pole zvyškových Misesových napätí v sonde po vychladnutí na teplotu ochladzovacieho oleja 60 °C vb čase 900 s. Hľadaný vplyv teploty oleja Isomax 166 na energetický stav sondy pre teploty v intervale 0 až 120 °C je graficky zobrazený na obr.6. Na obr.6 sú priebehy vypočítaných maximálnych (lokálnych) a stredných hodnôt vnútornej energie plastických deformácií. Stredné hodnoty sú vzťahnuté na celý objem valcovej sondy.

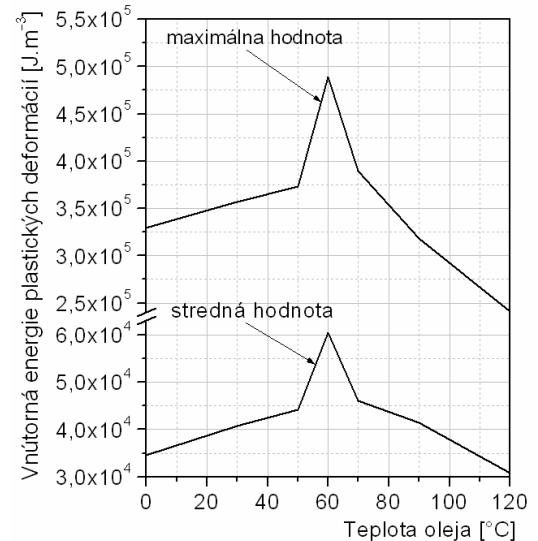
Vplyv teploty oleja na proces ochladzovania je zrejмый. Najnižšiu ochladzovaciu schopnosť vykazuje olej pri teplote 0 °C, najvyššiu pri teplote 60 °C. Charakter priebehu nameranej teploty sa výrazne zmenil pri teplote oleja 120 °C. Zvýšil sa odvod energie vo forme

tepla v oblasti plynného obalu. Dôsledkom toho bolo zníženie entalpie súčiastky a vo fáze varu sa odvieďlo najmenej tepla z intervalu vybraných teplôt oleja.

Rýchlosti ochladzovania sú odozvou strmosti priebehov nameraných teplôt. Najvyššiu hodnotu rýchlosti ochladzovania je možné dosiahnuť pri teplote oleja 60 °C, t. j. 109 K.s<sup>-1</sup>, najnižšiu pri teplote 120 °C, t. j. 92,5 K.s<sup>-1</sup>. Rýchlosť ochladzovania rastie od teploty oleja 0 °C po teplotu 60 °C a potom s narastajúcou teplotou klesá. Vzhľadom na najvyššiu hodnotu rýchlosti ochladzovania je relatívna zmena rýchlosti ochladzovania -15,1 %. Výrazným je účinok zvýšenej teploty oleja (120 °C) pri zvýšení rýchlosti ochladzovania v plynnom obale.



Obr. 5 Rozloženie v priereze sondy, a)  $W_p$  [J.m<sup>-3</sup>], b) zvyškového Misesovho napätia  $\sigma_M$  [Pa]



Obr. 6 Závislosti maximálnej a strednej  $W_p$  [J.m<sup>-3</sup>] od teploty oleja Isomax 166

Závislosti kombinovaného koeficienta prestupu tepla od teploty povrchu ukazujú vplyv teploty oleja nie len na zmenu číselných hodnôt  $h_{\text{komb}}(\vartheta_s)$ , ale aj na tvar krivky. V intervale teplôt 0 až 90 °C sa krivky  $h_{\text{komb}}(T_s)$  menia proporcionálne, no pri teplote 120 °C dochádza k zmene a krivka  $h_{\text{komb}}(\vartheta_s)$  sa vzhľadom k iným posúva k nižším teplotám steny. Najvýraznejší rozdiel  $h_{\text{komb}}(\vartheta_s)$  je medzi teplotami 0 °C a 60 °C a dosahuje hodnotu 1050 W.m<sup>-2</sup>.K<sup>-1</sup>.

Plynný obal zaniká a súčasne začína var oleja pri teplotách povrchu 677 až 690 °C. Var oleja končí prechodom do konvektívneho prestupu tepla pri teplotách povrchu sondy 277 až 310 °C.

Štruktúrna výpočtová analýza ukázala, že v priebehu ochladzovania vznikajú v objeme sondy vyššie napätia ako je elastický limit materiálu (medza sklzu), čoho dôsledkom je vznik plastických deformácií a po vychladnutí zvyškových napätí. Pri uvažovaní teplotnej elasticity materiálu dosiahnu Misesove ekvivalentné maximálne napätia 398 až 452 MPa.

Zvyškové napätia po vychladnutí sondy sú v celom objeme sondy, najvyššie hodnoty sú v splastizovanej oblasti tesne pod povrchom plášťa a dosahujú hodnotu 232 MPa. Vnútna energia plastických deformácií je dominantná taktiež v oblasti tesne pod povrchom plášťa a maximálnu hodnotu 489 kJ.m<sup>-3</sup> dosiahne pri teplote oleja 60 °C na plášti v mieste B.

## ZÁVER

Spojenie metódy experimentu a numerickej simulácie ukázalo, že je možné kvalitatívne a aj kvantitatívne analyzovať vplyv teploty chladiaceho oleja Isomax 166 na proces odvádzania

energie vo forme tepla z telesa sondy do oleja a jej vplyv na energetický stav tepelne spracovávanej súčiastky. Výskum ukázal, že vplyv teploty ochladzovacieho oleja má výrazný vplyv na parametre procesu.

Ochladzovacia schopnosť oleja Isomax 166 sa mení s jeho teplotou. Do teploty 60 °C sa ochladzovacia schopnosť zvyšuje. Najväčšiu schopnosť odvádzať energiu vo forme tepla má kaliači olej Isomax 166 pri teplote 60 °C. Po prekročení tejto teploty sa jeho ochladzovacia schopnosť znižuje.

Priebehy a hodnoty kombinovaného koeficienta prestupu tepla na teplovýmennnej ploche sondy sú závislé od teploty pokojného oleja Isomax 166. Kombinovaný koeficient prestupu tepla  $h_{\text{komb}}(Q_s)$  bol vypočítaný pre každú vybranú teplotu oleja. Najvyššia hodnota je pre olej s teplotou 60 °C (4288 W.m<sup>-2</sup>.K<sup>-1</sup>) a najnižšia pre olej s teplotou 0 °C (3238 W.m<sup>-2</sup>.K<sup>-1</sup>). Kvalitatívna zmena procesu ochladzovania sa prejavila pri teplote 120 °C.

Energetický stav ochladzovanej sondy vychladnutej na teplotu ochladzovaného oleja Isomax 166 je taktiež závislý od jeho teploty. Analýzy ukázali, že najvyššia úroveň vnútornej energie plastických deformácií sa dosiahne pri teplote oleja 60 °C. Mimo tejto teploty je generovaná vnútorná energia nižšia. Pri poklese teploty oleja smerom k 0 °C je jej pokles výrazný po teplotu 50 °C a potom mierne klesá. Nad teplotou 60 °C je jej výrazný pokles po teplotu 70 °C. Potom so vzrastom teploty opäť klesá a pokles je strnší ako pri teplotách pod 50 °C.

Záverom je možné vysloviť tvrdenie, že pre tepelné spracovanie súčiastok v pokojnom kaliačom oleji Isomax 166 najvyššia jeho schopnosť odvádzať teplo z povrchu súčiastky je pri teplote 60 °C. Pri tejto teplote vznikajú aj najvyššie stavy teplotnej napätosti. Ak je požiadavka dosiahnuť nižšie hodnoty generácie vnútorného stavu napätosti, potom je vhodné používať olej Isomax 166 s teplotami nad 60 °C.

Záverom je nám milou povinnosťou poďakovať za podporu riešenia tejto úlohy grantu MŠ SR a Slovenskej akadémie vied VEGA 1/2101/0 s názvom „Počítačové modelovanie prenosových javov aplikovaných na vybrané technologické a montážne procesy a procesy tepelného spracovania“.

## LITERATÚRA

- [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.: *Thermálna analýza kaliačeho testu typu IVF*. In Materials Science and Technology, 3, 2003. ISSN 1335-9053, [http://www.mtf.stuba.sk/buxus/generate\\_page.php?page\\_id=1696](http://www.mtf.stuba.sk/buxus/generate_page.php?page_id=1696)
- [3] Internet: [www.petrofer.com.ua/content/hardening\\_compound/2\\_1.htm](http://www.petrofer.com.ua/content/hardening_compound/2_1.htm), [online], [cit. 2006-4-06]
- [4] TARABA, B.: *Vplyv geometrie súčiastky na konvektívny prenos tepla v procese ochladzovania*. In: VÝPOČTOVÁ MECHANIKA: Computational mechanics 2003. Plzeň: Západočeská univerzita, 2003, s. 461-466
- [5] TREBUŇA, F., ŠIMČÁK, F.: *Odolnosť prvkov mechanických sústav*. Emilena, Košice, 2004
- [6] CHEN, W.F., HAN, D.J.: *Plasticity for Structural Engineers*. Springer-Verlag, New York, 1988
- [7] RADAJ Dieter: *Schweissprozesssimulation, Grundlagen und Anwendungen*, Verl. für Schweissen und Verwandte Verfahren, DVS-Verl., 1999
- [8] [www.matweb.com](http://www.matweb.com), [online], [cit. 2006-4-06]
- [9] STN 41 7240
- [10] TARABA, B., LAŠČEK, M.: *Vplyv teploty kaliačeho oleja Isomax 166 na jeho chladiace vlastnosti*. Vedecké práce Materiálovotechnologickej fakulty STU v Trnave, Materiálovotechnologická fakulta STU, 2006, č. 20