

# TERMÁLNA ANALÝZA KALIACEHO TESTU TYPU IVF\*

## THERMAL ANALYSIS OF THE QUENCH TEST TYPE IVF\*

\*(IVF = THE SWEDISH INSTITUTE OF PRODUCTION ENGINEERING RESEARCH)

Bohumil TARABA

*Autor: Ing. Bohumil Taraba, PhD.*

*Pracovisko: Katedra aplikovanej mechaniky, Materiálovotechnologická fakulta STU*

*Adresa: Paulínska 16, 917 24 Trnava, Slovensko*

*Tel.: 00421 33 5511 733, Fax: 00421 33 5511 668 E-mail: [taraba@mtf.stuba.sk](mailto:taraba@mtf.stuba.sk)*

### Abstract

*The article deals with the methodology of the solution of inverse heat conduction problem by using of nonlinear and transient numerical analysis. The heat transfer coefficient for convective heat transfer for quenching oil Isorapid 428 from the quench test IVF type are determined. The result is the function dependancy between heat transfer coefficient and the surface temperature.*

*Príspevok sa zaoberá metodikou riešenia ivnerzného problému vedenia tepla pri použití nelineárnej a nestacionárnej numerickej analýzy a získanie okrajovej podmienky jednoznačnosti konvektívneho prenosu tepla pre chladiaci olej Isorapid 428 z kaliaceho testu typu IVF. Výsledkom je funkčná závislosť koeficienta prestupu tepla konvekciou od teploty povrchu ochladzovanej súčiastky.*

### Key words

*thermal analysis, quench test, quench, heat, numerical analysis, heat transfer coefficient*

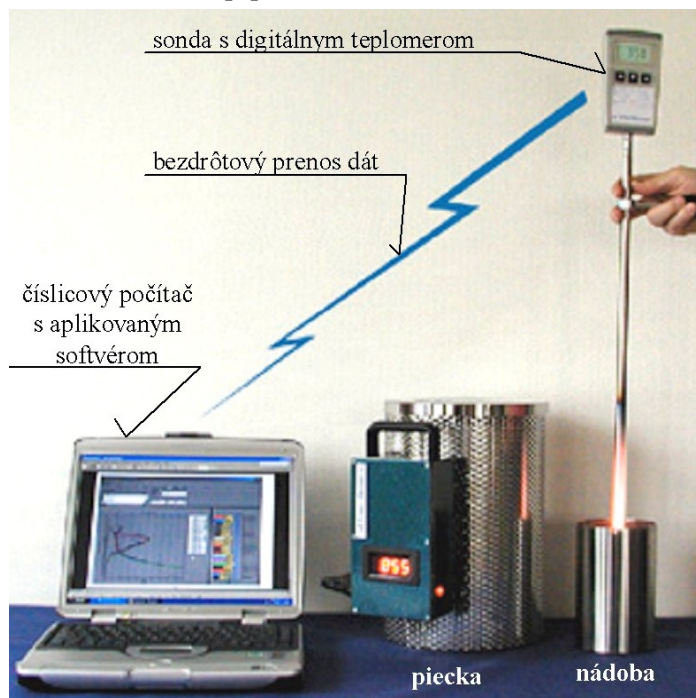
*analýza termálna, test kaliaci, kalenie, teplo, analýza numerická, koeficient prestupu tepla*

### Úvod

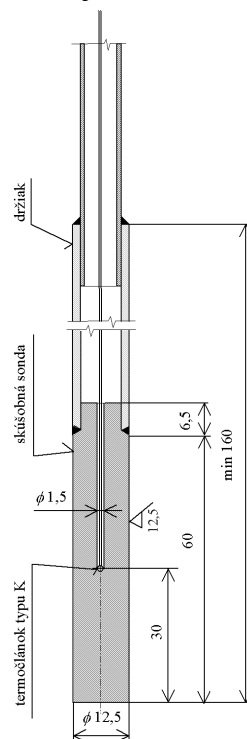
Technologické procesy tepelného spracovania ocelí sú vo všeobecnosti spojené s existenciou nestacionárnych teplotných polí a napätovo-deformačných stavov. Praktické skúsenosti ukazujú, že pri ochladzovaní súčiastok v rôznych prostrediach (kalení) s cieľom dosiahnuť kvalitatívnu zmenu štruktúry je vhodné predikovať napätovo-deformačné stavy. Spojením konštrukčného a technologického hľadiska za pomoci numerických analýz je možné efektívne navrhnuť tvar súčiastky, ktorý nespôsobí pri kalení jej nežiadúce deformácie a iniciačné miesta poškodení. Výpočet deformačno-napätových stavov vyžaduje poznanie teplotných polí, ktoré sú výsledkom numerickej analýzy simulačného modelu tepelnej úlohy s použitím nelineárnych podmienok jednoznačnosti.

## Kaliaci test typu IVF - Wolfsonova skúška

Medzinárodná normalizovaná skúška, ktorá sa využíva pre získanie chladiacej krivky  $T = f(t)$  je známa ako Wolfsonova skúška, obr. 1. Skúšobná sonda v tvare konečného valca s priemerom 12,5 mm a s dĺžkou 60 mm je zhotovené z materiálu Inconel 600, obr. 2. Teplota je snímaná v ťažisku valca púzdrovaným termočlánkom typu K (Cr-Ni), ktorý je v mieste ťažiska bodovo privarený na dne koaxiálneho otvoru. Wolfsonova skúška je normalizovaná normou ISO 9950 [1].



Obr. 1 Zariadenie pre kaliaci test typu IVF [2]



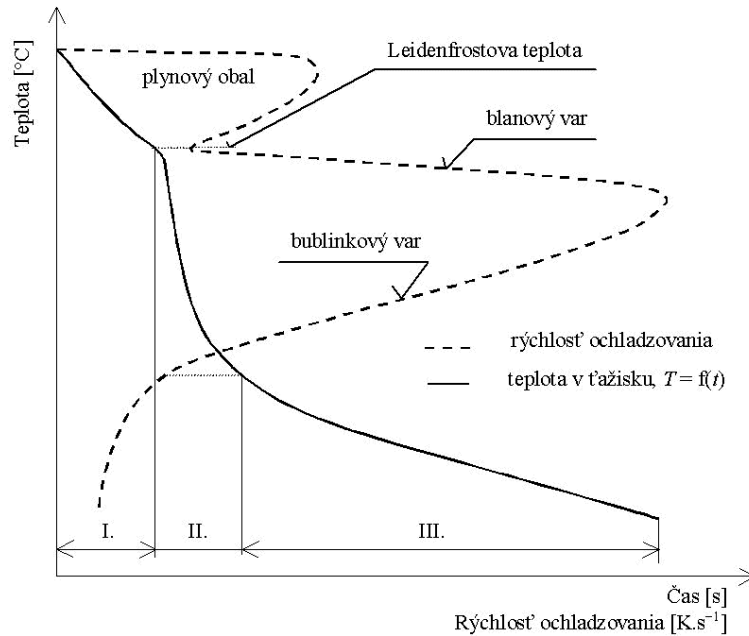
Obr. 2 Skúšobná sonda

Skúšobné teliesko je v peci ohriate na teplotu  $850 \text{ }^\circ\text{C} \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$  a ponorí sa do kúpeľa pokojného chladiaceho média s objemom 2000 ml a s teplotou  $40 \text{ }^\circ\text{C} \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ . Norma ISO 9950 udáva aj vlastnosti chladiaceho prostredia pre verifikačné merania [3].

Normalizované podmienky pre získavanie chladiacich kriviek, ktoré sa okrem ISO 9950 používajú vo svete sú uvedené v literatúre [4].

### Typická chladiaca krivka pre minerálne oleje

Chladiaci olej Isorapid 428 je minerálny olej obohatený chemickými aditívami. Typická chladiaca krivka, získaná z Wolfsonovej skúšky je zobrazená na obr. 3 spoločne s jej časovou deriváciou (rýchlosť ochladzovania). Proces ochladzovania v kvapalnom prostredí na báze minerálnych olejov je rozdelený do troch rôznych časových úsekov. Prvý časový úsek ukazuje vytvorenie plynového obalu spalín okolo teplovýmenej plochy, v ktorom je dominantný radičný prenos energie teplom. Po dosiahnutí Leidenfrostovej teploty [5] začína fáza blanového varu, ktoré so znižujúcou sa teplotou povrchu súčiastky prechádza do bublinkového varu. Konvektívny prenos tepla je charakteristický pre tretí časový úsek.



**Obr. 3** Typická chladiaca krivka pre minerálne oleje

Výsledkom meraní (pre každé médium minimálne 5 meraní) je určenie parametra oleja, ktorý sa nazýva IVF hardening power HP a podľa ktorého je chladiaca kvapalina hodnotená [1]. Pre potreby numerických analýz je vhodné výsledky z Wolfsonovej skúšky spracovať inverzno-numericko-korelačnou metódou (INK), 3. kapitola.

### Teoretické východiská [6, 7]

Zariadenie z obr. 1 je uvažované ako otvorený termodynamický systém. Prenos energie vo forme tepla zo sondy do chladiaceho prostredia je kombináciou žiarenia a konvekcie, t. j. prenos tepla charakterizovaný kombinovaným koeficientom prestupu tepla. Potom na plášti valcovej sondy (teplotýmenná plocha) v čase  $t_i$  platí rovnosť hustôt tepelných tokov kondukciou a konvekciou

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

kde  $\lambda(T)$  je koeficient tepelnej vodivosti [ $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ],  $h(T_s)$  je kombinovaný koeficient prestupu tepla [ $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ ],  $T_s(t)$  teplota povrchu steny [ $^{\circ}\text{C}$ ] a  $T_r$  je teplota neovplyvneného okolitého prostredia [ $^{\circ}\text{C}$ ],  $r$  a  $z$  sú súradnice v cylindrickom súradnicovom systéme [m].

Ďalšie predpoklady tepelnej úlohy: materiál skúšobnej sondy je izotropický a jeho termofyzikálne vlastnosti sú závislé od teploty  $\lambda(T)$ ,  $\rho(T)$ ,  $c(T)$ , proces ochladzovania je izobarický, teplotné pole nie je závislé od uhla  $\varphi$ ,  $T \neq f(\varphi)$ , teplota chladiaceho média je počas procesu konštantná,  $T_r \neq f(t)$ , zdroj tepla v jednotke objemu za jednotku času  $\dot{q}_v = 0 \text{ W} \cdot \text{m}^{-3}$ .

Gradient funkcie teplotného poľa  $T = f(r, z)$  v čase  $t_i$  ( $0 \leq t_i \leq 60$  s) je počítaný z riešenia Fourierovej-Kirchhoffovej diferenciálnej rovnice vedenia tepla pre cylindrický súradnicový systém v tvare

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda(T)}{c_p(T)\rho(T)} \left( \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right), \quad [\text{K}\cdot\text{s}^{-1}] \quad (2)$$

kde:  $c_p(T)$  je špecifická tepelná kapacita pri konštantnom tlaku,  $[\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}]$ ,  $\rho(T)$  hustota materiálu sondy  $[\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}]$  a  $t$  je čas  $[\text{s}]$ .

Tepelná úloha je riešená metódou konečných prvkov (MKP). V procedúre MKP je zápis rovnice (2) v tvare

$$(\mathbf{K}_1 + \mathbf{K}_2) \cdot \mathbf{T} + \mathbf{K}_3 \cdot \dot{\mathbf{T}} - \mathbf{P} = \mathbf{0}, \quad (3)$$

kde je:  $\mathbf{K}_1$  matica tepelnej vodivosti,  $\mathbf{K}_2$  matica tepelného zaťaženia, ktorá zahŕňa okrajové podmienky a vplyv vnútorných zdrojov,  $\mathbf{K}_3$  matica entalpie,  $\mathbf{P}$  vektor vonkajšieho zaťaženia,  $\mathbf{T}$  je vektor teplôt a  $\dot{\mathbf{T}}$  je vektor časových derivácií teploty.

Rýchlosť ochladzovania  $w$  je časová zmena teploty v ťažisku sondy. Matematické vyjadrenie je

$$w = \frac{dT(r, z)}{dt}, \text{ kde } r = 0 \text{ a } z = L/2. \quad [\text{K}\cdot\text{s}^{-1}] \quad (4)$$

Hodnota koeficienta prestupu tepla ako funkciu teploty povrchu sondy určíme z rovnice (1)

$$h(T_s) = \frac{q_{t_i}}{T_s(t_i) - T_r}. \quad [\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}] \quad (5)$$

Mierou korelácie medzi teplotami v ťažisku nameranými a vypočítanými na časovom intervale  $0 \div t_n$  je koeficient korelácie

$$r = \sum_{i=1}^{n-1} e_i e_{i+1} \left( \sum_{i=1}^{n-1} e_i^2 \right)^{-1}. \quad [-] \quad (6)$$

Vo vzťahu (6) je symbol  $e$  rovný rozdielu teploty zo štatisticky vyhodnotených meraní pre  $i$ -ty čas  $\tilde{T}_i$  a vypočítanej teploty  $T_{i,\text{vyp}}$ .

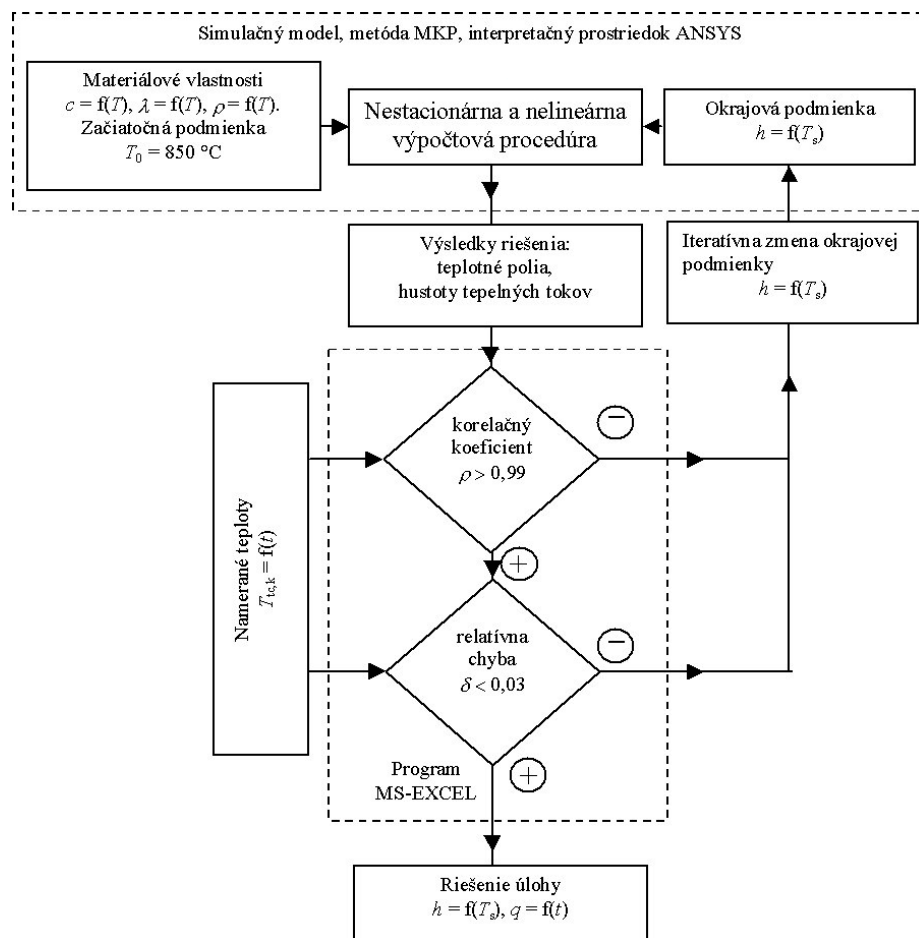
Skúsenosti z riešenia inverzných úloh vedenia tepla však ukazujú na nevyhnutnosť sledovania ďalšieho štatistického parametra, a to relatívnej chyby  $\delta_T$ :

$$\delta_T = \frac{|\tilde{T}_i - T_{i, \text{vyp}}|}{\tilde{T}_i} \quad [-] \quad (7)$$

Iteračnou metódou riešime úlohu inverznú úlohu vedenia tepla do stavu, kedy koeficient korelácie  $|r| \geq 0,99$  a relatívna chyba  $\delta_T \leq 0,03$ . Splnenie oboch štatistických parametrov umožňuje vyhlásiť, že hľadaná funkcia okrajovej podmienky je pravdepodobná s vysokým stupňom pravdepodobnosti a je možné ju aplikovať v konkrétnych numerických analýzach simulačných modelov technologických procesov.

### Metodológia INK riešenia

Z teoretického hľadiska je zjavné, že inverzné úlohy vedenia tepla majú nekonečne veľa riešení. Prostredníctvom INK metódy je možné nájsť riešenie úlohy, ktoré je veľmi pravdepodobné a použiteľné pre konkrétne procesy tepelného spracovania. Riešenie úlohy musí vyhovovať nasledovným nastaveným kritériám: koeficient korelácie medzi nameranými a vypočítanými teplotami v  $i$ -tych časoch musí byť vyšší ako 0,99 a relatívna chyba podľa (7) pre nameranú a vypočítanú teplotu v  $i$ -tom čase musí byť nižšia ako 0,03. Stredná absolútna hodnota relatívnej chyby pre výber teplôt v čase  $0 \leq i \leq n$  sa musí nachádzať v intervale  $(0; 0,03)$  s tendenciou približovať sa k nule.



**Obr. 4** Bloková schéma riešenia úlohy metódou INK

Metodológia inverzno-numericke-korelačného riešenia je znázornená v blokovej schéme na obr. 4. Vytvorený simulačný model je riešený metódou konečných prvkov. Vybrané výsledky ( $T_i$ ,  $T_{s,i}$  a  $q_{s,i}$ ) sú spracované prostredníctvom programu MS-EXCEL, v ktorom je vytvorený matematický model INK podľa rovníc (5) až (7). Pri nesplnení nastavených parametrov riešenia je iteratívnym prístupom zmenená okrajová podmienka v simulačnom modeli. Cyklus riešenia je opakovaný do stavu, kedy riešenie spĺňa nastavené parametre. Získané funkčné závislosti INK [ $h = f(T_s)$ ,  $q = f(t)$ ] je vhodné overiť opakovanými výpočtami s inými parametrami siete (typ elementu, veľkosť elementu) a zmenenými časovými krokmi. Po overovacích výpočtoch je možné získané funkčné závislosti koeficienta prestupu tepla od teploty povrchu, resp. závislosť hustoty tepelného toku od času vyhlásiť za riešenie úlohy s vysokým stupňom pravdepodobnosti.

### Numerická simulácia

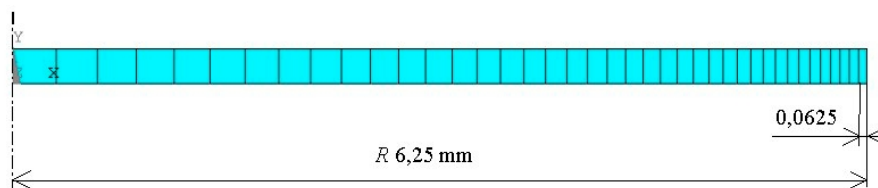
Numerická simulácia tvorí podstatnú časť riešenia úlohy. Využitie nástroja numerickej analýzy je rozdelené na dva kroky.

Prvý krok riešenia predpokladá, že skúšobná sonda je nekonečne dlhý valec s priemerom 12,5 mm. Výsledkom riešenia sú funkčné závislosti  $q = f(t)$  a  $h = f(T_s)$ .

V druhom kroku riešenia je aplikovaná konvektívna okrajová podmienka z predchádzajúceho výpočtu na model reálnej sondy. Cieľom je určiť mieru vplyvu odvodu tepla zo spodnej podstavy sondy a držiaku na časový priebeh teploty vo vzťažnom bode termočlánku.

### Geometrické modely

Geometrický model nekonečne dlhého valca je na obr. 5. Hranicu telesa a chladiaceho prostredia predstavuje osovosymetrický element so šírkou 0,062 mm, čo zabezpečuje akceptovateľnosť vypočítanej hustoty tepelného toku z povrchu sondy do média v  $i$ -tom čase procesu.

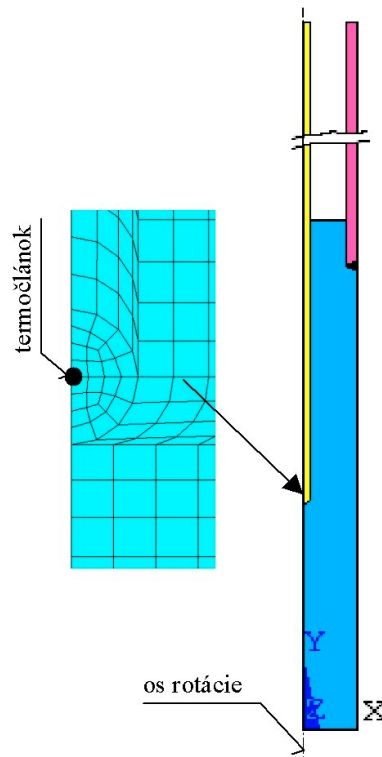


**Obr. 5** Geometrický model nekonečne dlhého valca

Reálnu konštrukciu sondy nahrádza osovosymetrický model z obr. 6. s detailom generovanej siete v mieste určovania vypočítanej teploty označenej „termočlánok“.

### Termofyzikálne materiálové vlastnosti

Sonda je zhotovená zo zliatiny Inconel 600. Chemické zloženie zliatiny v hmotnostných percentách je uvedené v tabuľke 1. Termofyzikálne vlastnosti sú prebrané z [8] a uvedené v tabuľke 2.



**Obr. 6** Geometrický model sondy z obr. 2

CHEMICKÉ ZLOŽENIE INCONEL 600  
V HMOTNOSTNÝCH % .....

Tabuľka 1

	Ni	Cr	Fe	C	Mn	Si
min	72,0	14,0	6,0	-	-	-
max	-	17,0	10,0	0,15	1,0	0,5
	Cu	Al	Ti	B	P	S
min	-	-	-	-	-	-
max	0,5	0,3	0,3	0,006	0,015	0,015

TERMOFYZIKÁLNE VLASTNOSTI

Tabuľka 2

$T$ [°C]	$\rho(T)$ [kg.m <sup>-3</sup> ]	$c(T)$ [J.kg <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> ]	$\lambda(T)$ [W.m <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> ]	$\alpha \cdot 10^6$ [K <sup>-1</sup> ]
20	8400	455	14,8	13,4
100	8338	475	15,8	13,7
200	8302	495	17,0	14,1
300	8264	508	18,4	14,4
400	8225	525	20,0	14,8
500	8185	550	22,0	15,1
600	8144	572	24,0	15,4
700	8101	602	25,7	15,8
800	8058	620	27,5	16,1
900	8014	630	29,4	16,4
1000	7964	635	31,2	16,9

## Začiatkové podmienky

Začiatková podmienka vychádza z Wolsonovej skúšky. V čase 0 s je teplota všetkých uzlových bodov obidvoch modelov 850 °C. Teplota ochladzovacieho prostredia sa počas procesu nemení. V riešenom prípade je  $T_r = 40$  °C.

## Zaťaženie geometrických modelov

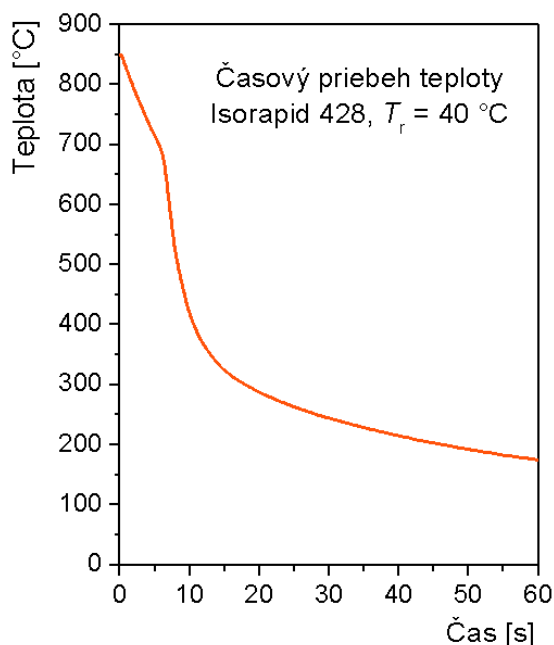
Zaťaženie geometrických modelov predstavuje z kvalitatívneho pohľadu okrajová podmienka tretieho druhu - konvektívny prenos tepla. Konvektívny prenos tepla je zadávaný do teplovýmennej plochy nekonečného valca a modelu sondy (plášťa). Kvantitatívna stránka konvektívneho zaťažovania je hľadaná v tvare funkcie  $h = f(T_s)$ .

## Atribúty numerickej analýzy

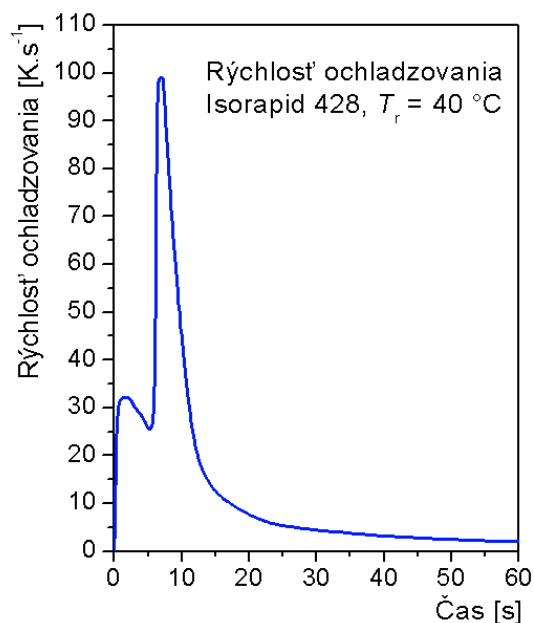
Interpretačným prostriedkom je programový súbor ANSYS. Generované siete sú vytvorené z rovinných osovymetrických termálnych elementov s kvadratickou bázovou funkciou. Úloha je riešená nestacionárne a nelineárne. Časový krok je volený s ohľadom na nutnú stabilitu výpočtu, dosiahnutie presnosti výpočtu a konvergenciu výpočtu.

## Experimentálne získané výsledky

Vzťažná závislosť teploty od času bola získaná z experimentálnych meraní [9]. Wolfsonova skúška bola realizovaná chladením sondy v chladiacom prostredí Isorapid 428. Zo súboru nameraných hodnôt bolo vybraných 37 dvojíc čas, teplota. Výber časových úsekov z časovej základne 0 až 60 s bol v dĺžke 0,25 s až 5 s v závislosti od rýchlosti ochladzovania. Časový priebeh teploty je na obr. 7. Obr. 8 ukazuje časovú závislosť rýchlosti ochladzovania v miesta merania. Formát z obr. 2 nebol použitý z dôvodu spracovania výsledkov z numerickej analýzy.



Obr. 7 Časový priebeh teploty



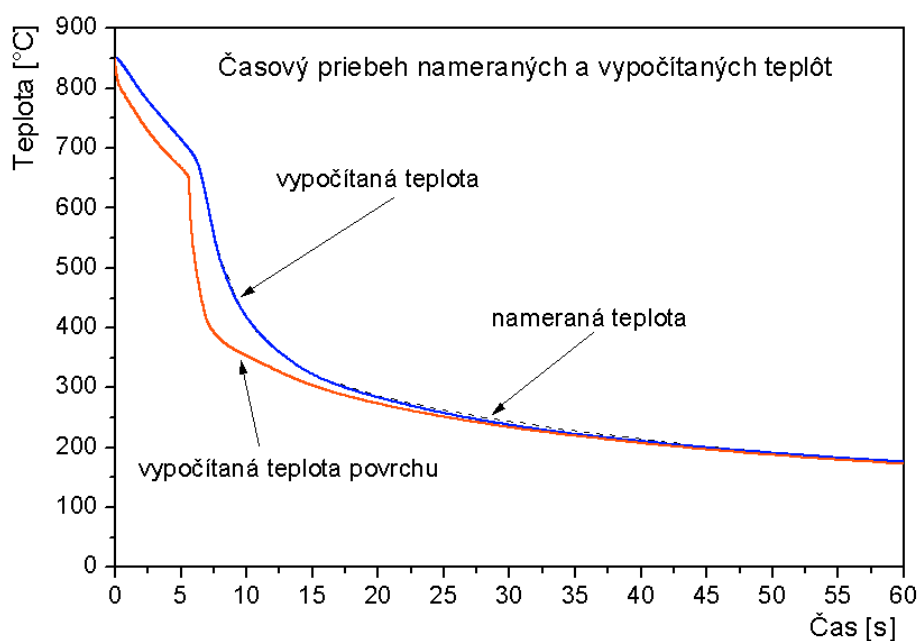
Obr. 8 Rýchlosť ochladzovania



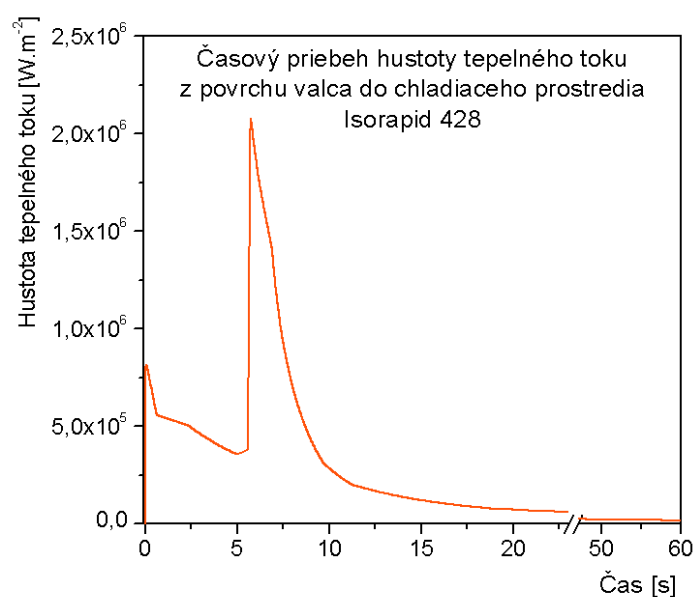
## Výsledky z numerickej simulácie

### *Nekonečný valec*

Vybrané výsledky z riešenia simulačného modelu nekonečného valca sú ukázané na obrázkoch 9 až 12. Obr. 9 zobrazuje vypočítanú časovú závislosť teploty v mieste merania a teplotu povrchu valca. Koeficient korelácie medzi nameranou časovou závislosťou teploty (obr. 7) a vypočítanou (obr. 8) je  $\rho_T = 0,99993$ . Súčasťou obr. 9 je aj krivka nameranej teploty z Wolfsonovej skúšky (čiarkovane). Zmena povrchu teploty v čase (obr. 9) a závislosť hustoty tepelného toku z povrchu valca do ochladzovacieho prostredia (obr. 10) sú podľa (5) nutným parametrami pre určenie  $h$ .

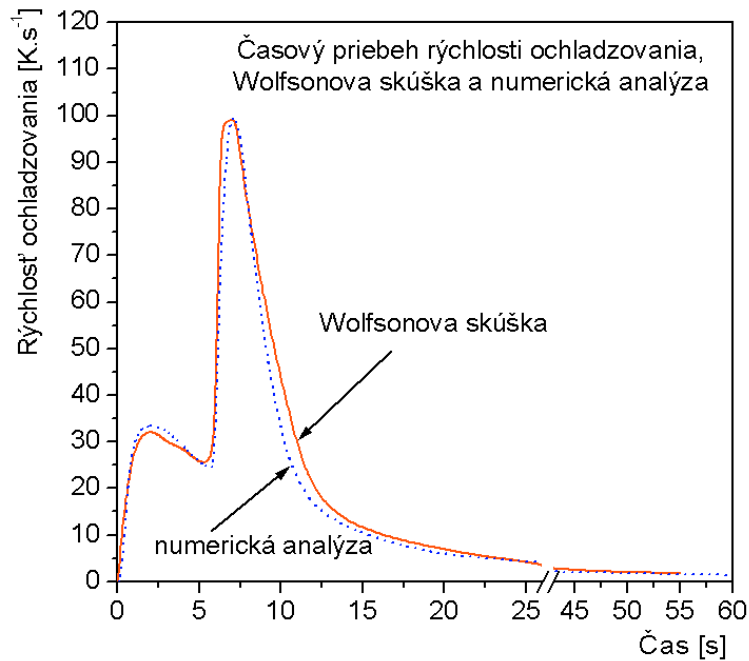


**Obr. 9** Časový priebeh nameraných a vypočítaných teplôt



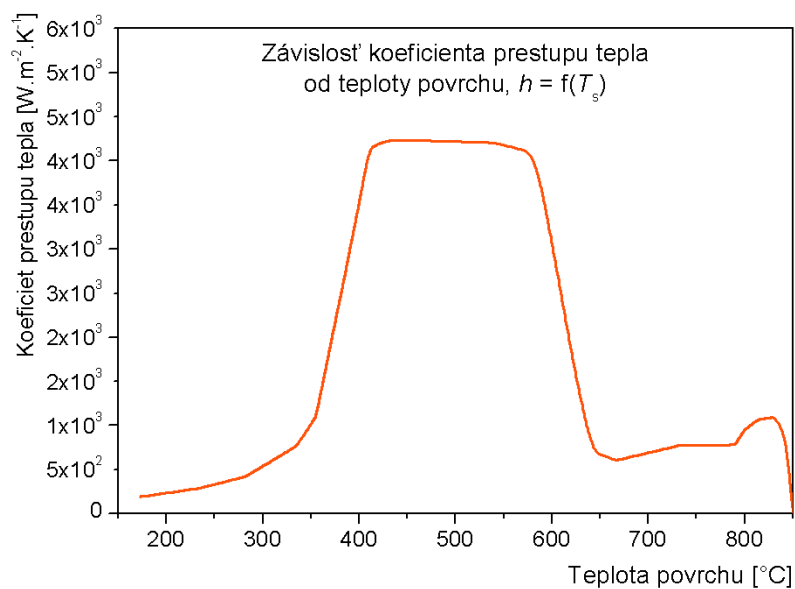
**Obr. 10** Časový priebeh hustoty tepelného toku

Porovnanie časových priebehov rýchlosti ochladzovania z merania a z výpočtu je na obr. 11. Dosiachnutá hodnota korelačného koeficienta je  $\rho_w = 0,9693$



**Obr. 11** Časový priebeh hustoty tepelného toku

Hľadaná funkčná závislosť koeficienta prestupu tepla od teploty povrchu  $h_s = f(T_s)$  je na obr. 12.



**Obr. 12** Závislosť koeficienta prestupu tepla od teploty povrchu

### Model reálnej sondy

Výsledky získané z výpočtu, kedy bol model reálnej sondy podľa obr. 6 zaťažený okrajovou konvektívnou podmienkou z obr. 12 ukázali, že konečnosť rozmerov, vplyv

podstavy valca, tvar držiaka a konštrukčné prvky sondy spôsobujú vzhľadom k modelu nekonečného valca chybu 1,18 %.

### Záver

Využitie výsledkov experimentálnych meraní vo forme Wolfsonovej skúšky prostredníctvom nelineárnych a nestacionárnych numerických analýz pri nastavení kritérií podľa metódy INK umožňuje získať jednotlivé parametre tepelného procesu. Zvlášť významným je poznanie funkčnej závislosti koeficienta prenosu tepla konvekciou od teploty povrchu, pretože pri ochladzovaní súčiastok v konkrétnej tekutine je možné predikovať nestacionárne teplotné polia a s nimi spojené deformačno-napät'ové stavy. Získané funkčné závislosti  $h = f(T_s)$  majú individuálny charakter a možno ich aplikovať pre zvislé steny súčiastok v prípade, že súčiastka je ochladzovaná v pokojnom ochladzovacom prostredí.

Použitie zjednodušeného modelu v tvare nekonečného valca zaťažuje získaný výsledok chybou 1,18 %, čo je možné v technickej praxi rešpektovať ako parameter procesu malého významu.

### Literatúra:

- [1] BODIN, SEGERBERG,S. Measurement and Evaluation of the Power Quenching Media for Hardening. In: *Heat treatment of metals*, 1993, 1, s. 15-22.
- [2] Internet: <http://www.ecosond.cz/>, 25.8.2003.
- [3] Internet: <http://www.iso.ch/iso/en/ISOOnline.opennerpage>, 25.8.2003
- [4] TOTTEN,G., WEBSTER,G., TENSI,H. a i. Standards for Cooling Curve Analysis of Quenchants. In *Heat treatment of metals*, 1997, 4, s. 92-94.
- [5] MACKENZIE,D.S., GUNSALUS,L., LAZEREV,I. Effects of Contamination on Quench-oil Cooling Rate. Internet: [http://www.industrialheating.com/CDA/ArticleInformation/features/BNP\\_Features\\_Item/0,2832,70014,00.html](http://www.industrialheating.com/CDA/ArticleInformation/features/BNP_Features_Item/0,2832,70014,00.html), 25.8.2003
- [6] TARABA,B., BEHÚLOVÁ,M., KRAVÁRIKOVÁ,H. *Mechanika tekutín, Termomechanika*. Bratislava: ES STU, 1999.
- [7] TARABA, B.: Numerické metódy pri riešení teplotných polí pri kalení. In *Vedecké práce MTF STU, Zväzok 13*. Bratislava: Vydavateľstvo STU, 2002.
- [8] Internet: [http://www.kruppvdm.com/\\_pdf/Nicrofer\\_7216\\_7216H\\_e.pdf](http://www.kruppvdm.com/_pdf/Nicrofer_7216_7216H_e.pdf), 25.8.2003
- [9] MACH, M. Diplomová práca. Materiálovotechnologická fakulta STU, Trnava, 2002.
- [10] DOLEŽAL,P., KOUŘIL, M. Stanovení ochladzovacích účinností kalících médií měřením teploty v jádře a na povrchu tělesa. In *18. dni tepelného zpracování s mezinárodní účastí: Sborník přednášek*. Brno: 2000.
- [11] ŠTASTNÍK,S. Modelování nestacionárního 3D teplotního pole v železobetonových konstrukcích. In *Betonářské dny 2002*. Pardubice: 2002, preprint.