

SIMULAČNÝ MODEL PRE PROCES OCHLADZOVANIA TENKOSTENNÝCH RÚROK

SIMULATION MODEL FOR THE PROCESS OF COOLING OF THIN-WALLED PIPES

Mária BEHÚLOVÁ

Autori: **RNDr. Mária Behúlová, CSc.**
Pracovisko: **Slovenská technická univerzita v Bratislave, Materiálovotechnologická fakulta so sídlom v Trnave, Ústav výrobných systémov a aplikovanej mechaniky**
Adresa: **Paulínska 16, 917 24 Trnava, Slovenská republika**
Tel.: **+421-918 646 035, +421 33-55 11 601**
E-mail.: **mária.behulova@stuba.sk**

Abstract

V príspevku je prezentovaný parametrický simulačný model pre ochladzovanie tenkostenných rúrok na vzduchu mechanizmom voľnej konvekcie a radiácie. Simulačný model bol verifikovaný prostredníctvom experimentálneho merania teplôt a použitý pre analýzu modelového procesu ochladzovania pri daných geometrických a procesových parametroch ochladzovania rúrok. Simulačný model bude následne aplikovaný pre tvorbu nomogramov pre stanovenie doby ochladzovania rúrok v závislosti od vybraných parametrov.

Parametric simulation model for air cooling of thin-walled pipes by mechanisms of free convection and radiation is presented in the paper. Simulation model was verified by experimental temperature measurement and applied for analysis of a modelled cooling process with given geometrical and process parameters of cooling. Simulation model will be consequently exploited for the development of nomograms for the determination of pipe cooling time in the dependence on chosen parameters.

Key words

tenkostenné rúrky, simulačný model, parametrické modelovanie, ochladzovanie voľnou konvekciou a radiáciou, ANSYS

thin-walled pipes, simulation model, parametric modelling, free convection and radiation cooling, ANSYS

Úvod

Vo výrobnej praxi je stále dôležitejšie veľmi rýchlo a flexibilne reagovať na požiadavky zákazníkov. Pre daný výrobný proces to znamená pružne modifikovať parametre jednotlivých operácií s cieľom efektívneho dosiahnutia produkcie polotovarov alebo finálnych výrobkov v požadovanom množstve a kvalite. Jednou z progresívnych metód pre stanovenie procesových parametrov je využitie numerickej simulácie [1-7].

V príspevku je prezentovaný simulačný model pre analýzu procesu ochladzovania tenkostenných rúrok pri parametricky definovaných geometrických, procesových, začiatočných a okrajových podmienkach. Vypracovaný simulačný model bude slúžiť pre tvorbu nomogramov pre stanovenie doby ochladzovania tenkostenných rúrok v závislosti od vybraných parametrov.

Matematický model nestacionárneho vedenia tepla v tuhých telesách

Nestacionárne vedenie tepla v tuhých telesách popisuje Fourierova-Kirchhoffova parciálna diferenciálna rovnica [8, 9]

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) \right] + q_v, \quad [\text{W.m}^{-3}] \quad (1)$$

kde ρ je hustota, c je špecifická tepelná kapacita, λ_x , λ_y , λ_z [$\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$] sú koeficienty tepelnej vodivosti v smere jednotlivých súradnicových osí a q_v je objemová hustota vnútorných zdrojov tepla.

Pre tuhé izotropné látky ($\lambda_x = \lambda_y = \lambda_z = \lambda$) prechádza rovnica (1) do tvaru

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \left(\nabla^2 T + \frac{q_v}{\lambda} \right), \quad [\text{K.s}^{-1}] \quad (2)$$

kde $a = \frac{\lambda}{\rho c}$ [$\text{m}^2.\text{s}^{-1}$] je koeficient teplotnej vodivosti (tepelná difuzivita) a $\nabla^2 T = \nabla \cdot \nabla T = \Delta T$ je Laplaceov operátor teploty.

Pre jednoznačné riešenie Fourierovej-Kirchhoffovej diferenciálnej rovnice vedenia tepla je potrebné definovať podmienky jednoznačnosti, a to

- geometrické (tvar telesa a jeho rozmery),
- fyzikálne (materiálové vlastnosti),
- začiatočné (rozloženie teplôt $T = T(x, y, z, t = 0)$ na začiatku procesu) a
- okrajové (podmienky na rozhraní telesa a okolitého prostredia).

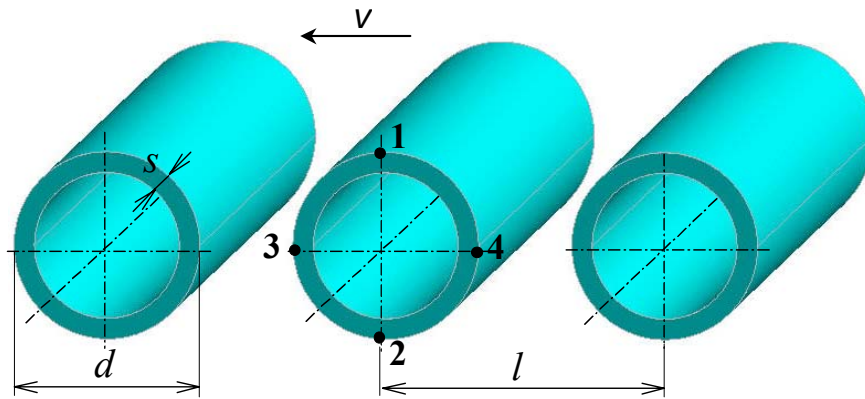
Parametrický simulačný model

Simulačný model pre proces ochladzovania tenkostenných rúrok bol vypracovaný parametricky pre nasledujúce voliteľné parametre:

- geometrické (obr. 1)
 - vonkajší priemer rúrky d ,
 - hrúbka steny rúrky s ,
 - vzdialenosť osí rúrok l ,
- procesové
 - ochladzovanie po ohreve v komorovej peci (rúrky vychádzajú z pece naraz),
 - ochladzovanie po ohreve priebežnej peci s rýchlosťou pohybu pásu v ,
- začiatočné
 - začiatočná teplota rúrok T_0 ,
- okrajové
 - teplota okolitého vzduchu T_r .

Rúrky sú zo začiatočnej teploty T_0 ochladzované na vzduchu s teplotou T_r mechanizmom kombinovaného prenosu tepla konvekciou a radiáciou. Koeficient prestupu tepla h pri voľnej konvekcii do neobmedzeného priestoru bol stanovený na základe kritériálnej rovnice [8, 9]

$$Nu_{L,m} = C Ry_{L,m}^n, \quad [-] \quad (3)$$



Obr. 1. Schéma uloženia rúrok pri ochladzovaní

kde $Nu = \frac{hL}{\lambda}$ je Nusseltovo číslo, $Ry = \frac{gL^3\alpha_v\Delta T}{av}$ je Rayleighovo číslo, pričom L je charakteristický rozmer [m] (pre horizontálnu rúrku $L = d$, t. j. vonkajší priemer rúrky), α_v je koeficient teplotnej rozťažnosti vzduchu [K^{-1}], $\Delta T = T_s - T_r$ je teplotný rozdiel medzi povrchovou teplotou rúrky T_s a teplotou okolia T_r [K], g je gravitačné zrýchlenie, v je kinematická viskozita vzduchu [$m^2 \cdot s^{-1}$], λ je koeficient tepelnej vodivosti a a koeficient teplotnej vodivosti vzduchu [$m^2 \cdot s^{-1}$]. Charakteristickou teplotou pre kritériálnu rovnicu (3) je stredná teplota medznej vrstvy $T_m = (T_s + T_r)/2$. Konštanty C a n závisia od veľkosti Rayleighovho čísla podľa tabuľky 1. Výpočet koeficientu prestupu tepla v závislosti od povrchovej teploty rúrky bol implementovaný do programového systému ANSYS vo forme užívateľsky definovaného podprogramu [10].

HODNOTY KONŠTÁNT PRE KRITÉRIÁLNU ROVNICU (3) [8] Tabuľka 1

$Ry_{L,m}$	C	n
0 až 10^{-3}	0,45	0
10^{-3} až 500	1,18	1/8
500 až $2 \cdot 10^7$	0,54	1/4
$2 \cdot 10^7$ až 10^{13}	0,135	1/3

Žiarivý tok Φ_{12} [W], vymieňaný medzi plochami S_1 a S_2 s povrchovými teplotami T_1 , T_2 a emisivitami ε_1 , ε_2 , je daný vzťahom [8, 9, 11]

$$\Phi_{12} = \varepsilon_1 \varepsilon_2 C_0 S_r \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right] \varphi_{12} \quad [\text{W}] \quad (4)$$

kde $C_0 = 5,67 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$ je koeficient žiarenia dokonale čierneho telesa, S_r je referenčná plocha (S_1 alebo S_2) a φ_{12} je uhlový koeficient ožiarenia

$$\varphi_{12} = \frac{1}{S_r} \int_{S_1} \int_{S_2} \frac{\cos \varphi_1 \cos \varphi_2}{\pi r^2} dS_2 \cdot \quad [-] \quad (5)$$

Koeficient ožiarenia predstavuje geometrický parameter, ktorý závisí od tvaru, rozmerov a vzájomného usporiadania plôch. Pre vzájomné usporiadanie rúrok podľa obr. 1 je možné koeficient ožiarenia určiť zo vzťahu [12]

$$\varphi_{12} = \frac{1}{\pi} \left[\arcsin \frac{d}{l} + \sqrt{\left(\frac{l}{d}\right)^2 - 1} - \frac{l}{d} \right]_2 \quad [-] \quad (6)$$

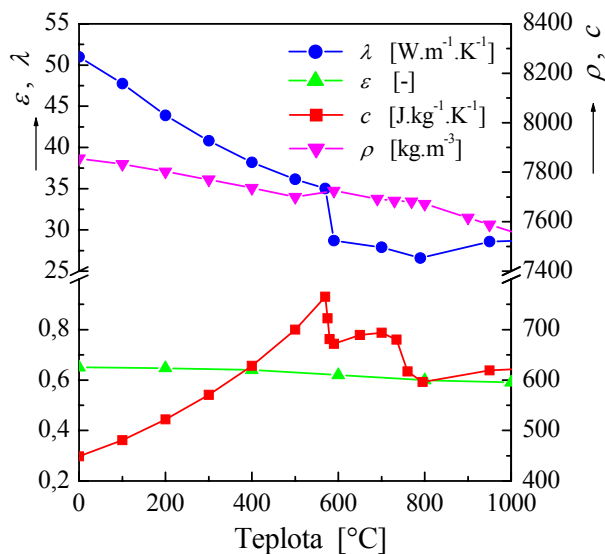
V prostredí programového systému ANSYS je výpočet koeficientu ožiarenia medzi definovanými plochami zabezpečený automaticky. Zároveň je možné zohľadniť odvod tepla radiáciou z povrchu rúrok do okolia [10].

Modelová analýza a verifikácia simulačného modelu

Popísaný simulačný model bol použitý pre numerickú analýzu ochladzovania rúrok z nízkoaliovaného ocele s vonkajším priemerom $d = 35,5$ mm a hrúbkou steny $s = 3,3$ mm zo začiatočnej teploty $T_0 = 800$ °C na vzduchu s teplotou $T_r = 20$ °C. Osi rúrok boli od seba vzdialené 150 mm. Materiálové vlastnosti ocele s chemickým zložením 0,1C-0,25Si-1,25Mn-0,3Ni-0,01N-0,03Al [hmot. %] boli zadávané do simulačného modelu v závislosti od teploty (obr. 2).

V súlade s následným verifikačným experimentom (obr. 3) boli skúmané časové závislosti teplôt v bodoch 1 až 4 (obr. 1). Na základe týchto závislostí bol hodnotený vplyv prúdenia vzduchu pri voľnej konvekcii na podmienky ochladzovania spodnej a vrchnej časti rúrok, ako aj vzájomné tepelné ovplyvňovanie sa susediacich rúrok.

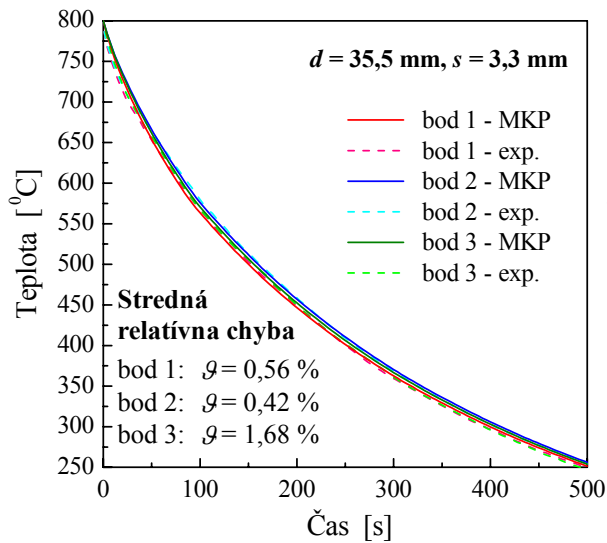
Z porovnania časových závislostí nameraných a vypočítaných teplôt v bodoch 1 až 3 (obr. 2, obr. 3) vyplýva veľmi dobrá zhoda výsledkov experimentálneho merania a numerickej simulácie. Stredné relatívne chyby vypočítaných teplôt sa pohybujú v rozmedzí 0,42 % (bod 2) až 1,38% (bod 3).



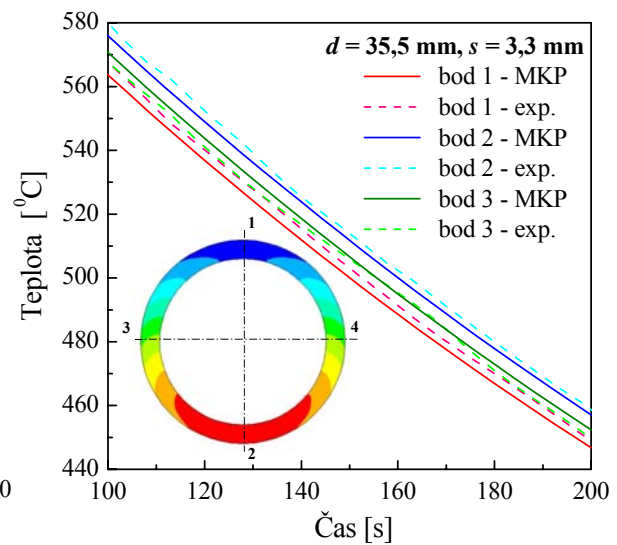
Obr. 2. Termofyzikálne vlastnosti ocele v závislosti od teploty



Obr. 3. Experimentálne meranie teplôt pri ochladzovaní rúrok



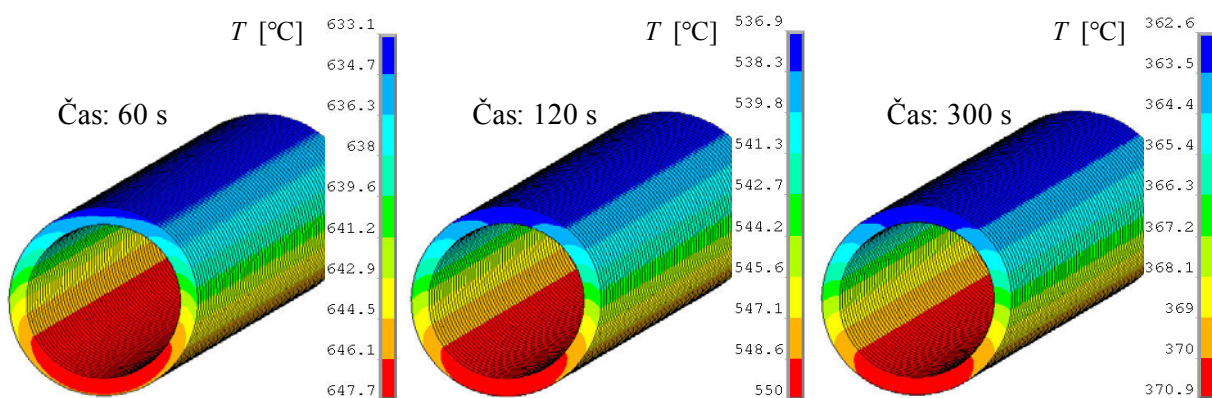
Obr. 2. Časová závislosť nameraných a vypočítaných teplôt v bodoch 1 až 3



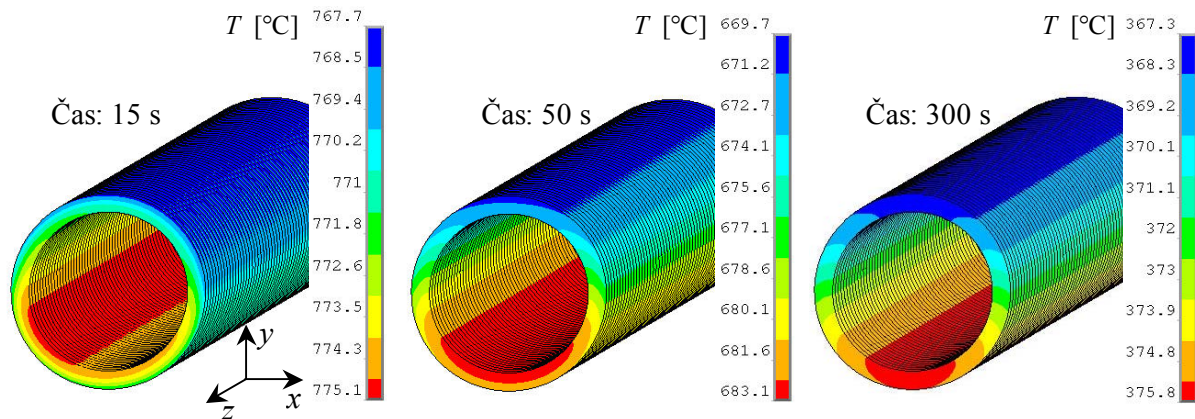
Obr. 3. Detail časovej závislosti nameraných a vypočítaných teplôt v bodoch 1 až 3

Vzhľadom na intenzívnejší odvod tepla voľnou konvekciou je horná polovica rúrok ochladzovaná rýchlejšie ako ich spodná časť (obr. 4). Maximálne teplotné rozdiely v prostrednej rúrke na úrovni približne $13 \text{ }^\circ\text{C}$ sú v časovom intervale 40 – 140 sekúnd. V ďalšom priebehu ochladzovania sa teplotné rozdiely medzi maximálnou teplotou a minimálnou teplotou znižujú.

Pri ohreve v priebežnej peci vychádzajú rúrky z pece postupne po časovom intervale, ktorý závisí od uloženia rúrok (vzdialenosti l) a rýchlosti pohybu pásu v . Prostredná rúrka je teda tepelne ovplyvňovaná rúrkou, ktorá vyšla z pece tesne pred ňou a je už čiastočne ochladená a po danom čase rúrkou, ktorá vychádza z pece ako ďalšia a má vyššiu teplotu ako prostredná rúrka. Z tohto dôvodu nie je teplotné pole v rúrke symetrické podľa roviny yz , prechádzajúcej osou rúrky a teploty v bodoch 3 a 4 sú odlišné (obr. 5). Pre analyzovanú vzdialenosť rúrok $l = 150 \text{ mm}$ a rýchlosť posuvu pásu $10 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ až $50 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ sú rozdiely teplôt v bodoch 2 a 3 nevyrazné (obr. 6), pričom klesajú s rastúcou rýchlosťou posuvu pásu.

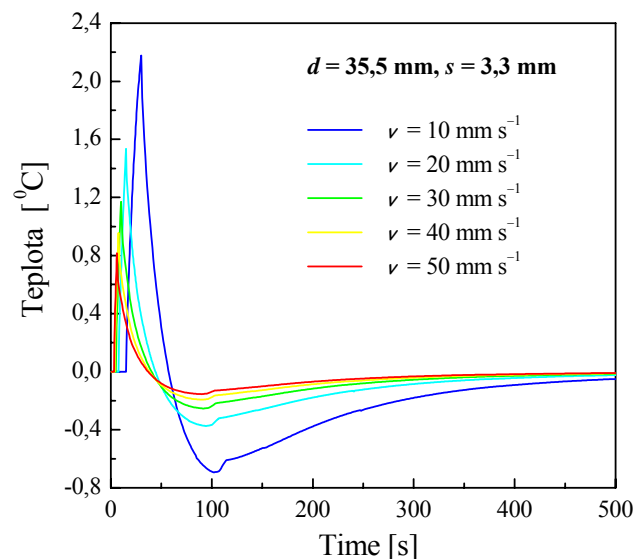


Obr. 4. Teplotné pole v prostrednej rúrke vo vybraných časoch ochladzovania



Obr. 5. Teplotné pole v prostrednej rúrke vo vybraných časoch ochladzovania pre rýchlosť posuvu pásu $20 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$

Vypočítané rozdiely medzi minimálnou a maximálnou teplotou v rúrke sa pre uvažované rýchlosti posuvu pásu $10 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ až $50 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ pohybujú v rozmedzí $12 \text{ }^\circ\text{C}$ až $16 \text{ }^\circ\text{C}$ (obr. 5 pre $v = 20 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$). Vzhľadom na relatívne malé teplotné rozdiely sa rýchlosti ochladzovania jednotlivých častí rúrky výrazne neodlišujú a nemali by teda viesť k tvorbe nehomogénnych, resp. odlišných mikroštruktúr po obvode rúrky.



Obr. 6. Rozdiel teplôt v bode 3 a 4 v závislosti od času pre rýchlosti posuvu pásu $10 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ až $50 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$

Záver

Vytvorený a experimentálne verifikovaný parametrický simulačný model pre ochladzovanie tenkostenných rúrok bol použitý pre riešenie modelového procesu ochladzovania rúrok pri daných geometrických a procesových charakteristikách. V nasledujúcom období bude popísaný simulačný model využitý pre analýzu teplotných polí pri ochladzovaní tenkostenných rúrok v závislosti od jednotlivých parametrov a tvorbu nomogramov pre stanovenie doby ochladzovania rúrok.

Pod'akovanie

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

Zoznam bibliografických odkazov:

- [1] TARABA, B. Návrh počítačového simulačného modelu pre tepelnú a štruktúrnu analýzu tepelne spracovávaného strižníka. In *Vedecké práce Materiálovotechnologickej fakulty Slovenskej technickej univerzity v Bratislave so sídlom v Trnave*. Zväzok 10. Bratislava: Vydavateľstvo STU, s. 127-1342001. ISBN 80-227-1852-4
- [2] MAŠEK, B. BEHÚLOVÁ, M., MAHN, U., MEYER, L.W. Application of FEM simulation for the support of design and optimisation of forming processes. In *XXVI. Verformungskundliches Kolloquium : Tagungsband*. Plannersalm, Steiermark. - Leoben : Umformtechnik, 2007, s. 171-180. ISBN 978-3-902078-09-4
- [3] MAŠEK, B., NOVÝ, Z., KEŠNER, D. Computer Simulation of Technological Chain by Free Forging. In *14th International Forgemasters Meeting IFM 2000*. Wiesbaden.
- [4] KAPUSTOVÁ, M., KOŠŤÁLOVÁ, M. Optimalizácia tvaru predkovacej dutiny nástroja pomocou počítačovej simulácie. Optimization of tool blocking cavity shape by help of computer simulation. In *METAL 2007 / nadát. Mezinárodní konference metalurgie a materiálů*. Hradec nad Moravicí, Ostrava: Tanger, 2007. ISBN 978-80-86840-33-8
- [5] KRAVÁRIKOVÁ, H. Modelovanie a simulácia v technologickom procese zvárania. In *Fluid Mechanics and Thermomechanics: Zborník / nadát. Mezinárodní vedecká konferencia katedier mechaniky tekutín a termomechaniky*. XXV. Modra-Harmónia, Bratislava: STU v Bratislave, 2006. ISBN 80-227-2434-3
- [6] POKUSOVÁ, M., POKUSA, A., MOJŽIŠ, M. Počítačová simulácia tuhnutia pri vnútroformovej modifikácii. Computer simulation of solidification for in-mold technology. In: *Quo vadis zlievarenstvo? : 2. medzinárodní zlievarenská konferencia*. Bardejovské kúpele, Košice: Technická univerzita v Košiciach, 2007, s. 16.
- [7] MARTINKOVIČ, M. Comparison of numerical model and real microstructure of injection moulding plastic part. In: *Development of Materials Science in Research and Education : Proceedings / nadát. Joint seminar. 15th. DMS-RE 2005*. Kežmarské Žľaby, September 5-9, 2005. Bratislava: NOI, 2005, s. 50-51. ISBN 80-89088-42-2
- [8] INCROPERA, F. P., DeWITT, D. P. *Fundamentals of heat and mass transfer*. New York: J. Wiley and Sons, 1996.
- [9] TARABA, B., BEHÚLOVÁ, M., KRAVÁRIKOVÁ, H. *Mechanika tekutín. Termomechanika*. Bratislava: Vydavateľstvo STU, 2002.
- [10] Ansys Theoretical Manual, Release 10.0., SAS IP, Inc., 2006.
- [11] KIZEK, J. Stanovenie priamych sálavých plôch pre výmenu tepla žiarením. In: *Energetické premeny v priemysle / Zborník zo 4. medzinárodní konferencie*. Košice. Košice: TU-HF, 1994.
- [12] KUTATELADZE, S. S., BORIŠANSKIJ, V. M. *Průručka sdílení tepla*. Praha: SNTL, 1962.