

## Stanovení součinitele přestupu tepla při ochlazování kolejnic

Jiří Marek<sup>1</sup>, Miroslav Příhoda<sup>1</sup>, Zdeněk Toman<sup>1</sup>, Mária Čarnogurská<sup>2</sup>

<sup>1</sup> VŠB – TU Ostrava, Fakulta metalurgie a materiálového inženýrství, Katedra tepelné techniky, 17. listopadu 15, Ostrava-Poruba, miroslav.prihoda@vsb.cz

<sup>2</sup> Technická univerzita v Košiciach, Strojnícka fakulta, Katedra energetickej techniky, Letná 9, Košice, maria.carnogurska@tuke.sk

**Abstrakt** V současné železniční dopravě neustále rostou provozní rychlosti, což klade zvýšené nároky na užité vlastnosti kolejnic. Hlavním způsobem ke zlepšení mechanických vlastností kolejnic je řízené ovlivnění mikrostruktury materiálu. Pro aktivní řízení teplotně deformačního režimu při výrobě kolejnic je nezbytné znát vliv kinetiky teplotního pole na jejich strukturu. Příspěvek se zabývá řešením teplotních polí při ochlazování kolejnic, hledáním optimální metody řešení a stanovením okrajových podmínek. Je popsána experimentální metoda měření ochlazovacích křivek. Z naměřených teplot byl prostřednictvím inverzní úlohy stanoven součinitel přestupu tepla.

### 1 Úvod

Nejdůležitější a nejvíce namáhanou částí železničního svršku je kolejnice, protože tlaková napětí na kontaktu kolo – kolejnice dosahují hodnot 500 až 2000 MPa. Kolejnicová ocel musí být vzhledem k namáhání a zatížení pevná, odolná proti opotřeбенí a přitom houževnatá. V současnosti se používají oceli na bázi C - Mn, nebo legované Si, Cr, Mo. Zvýšení obsahu uhlíku není žádoucí, protože současně s tím stoupá křehkost a klesá svařitelnost. Proto se uplatňuje mikrolegování a tepelné zpracování s cílem ovlivnit strukturu lamelárního perlitu [1, 2].

Z uvedeného vyplývá důraz na znalost teplotního pole kolejnice a okrajových podmínek při ochlazování (součinitel přestupu tepla, teplota média). Literatura, zabývající se problémem teplotních polí, popisuje především úlohy s provalky jednoduchých tvarů (pás, plech). Řešení profilového sortimentu je složitější a některé navrhované metody jsou příliš zjednodušující a výsledky řešení nepřesné. Nedílnou součástí je také analýza vlivu intenzity chlazení na vzniklou strukturu, zhodnocení a kontrola mechanických vlastností. Jednotlivé okruhy řešení se dají rozdělit do následujících bodů:

- Rozbor řešení teplotního pole – analýza tepelné bilance, hlavní druhy odvodů tepla.
- Metoda řešení – metoda konečných prvků, využití programů (FORMFEM, ANSYS), vytvoření numerického modelu.
- Podmínky jednoznačnosti – rozbor a určení podmínek řešení.
- Experimentální stanovení okrajových podmínek řešení – návrh metodiky měření, podmínek, jejich vyhodnocení a využití pro nepřímou úlohu.
- Aplikace modelu chlazení – predikce struktury a materiálových vlastností, vliv rychlosti ochlazování na výslednou strukturu

### 2 Metody a data

Pokles teploty u profilové oceli je odlišný než u bloků a bram, neboť složitost tvaru vnáší celou řadu zvláštností, jako např. vzájemné osálávání některých povrchů. Výsledkem je nerovnoměrné teplotní pole po průřezu vývalku.

Kinetiku teplotního pole v tuhém tělese popisuje Fourierova rovnice vedení tepla. V případě kolejnice lze uvažovat jen 2D teplotní pole v příčném směru profilu, neboť teplotní gradienty v podélném směru jsou zanedbatelné. Neuvažují-li se vnitřní objemové tepelné zdroje má rovnice tvar [3]:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \cdot \left( \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} \right) \quad (\text{K} \cdot \text{s}^{-1}) \quad (1)$$

kde  $a$  je součinitel teplotní vodivosti ( $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ ).

Řešení rovnice (1) vyžaduje pro každý konkrétní případ stanovení podmínek jednoznačnosti, a to fyzikálních, geometrických a okrajových.

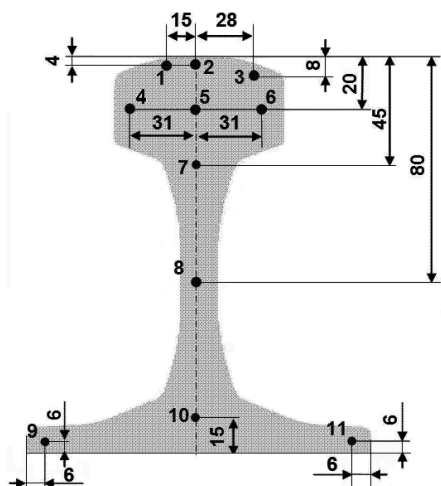
Analytické řešení složitých případů není možné a nutné zjednodušení sebou přináší nepřesné výsledky. Pro řešení je vhodné použít numerickou metodu, např. MKP [4]. Metoda konečných prvků (MKP/FEM) vychází z transformace problému diferenciálního na problém variační. Dnes existuje mnoho softwarových programů, které s touto metodou pracují a řeší úlohu podle vstupních dat samostatně, např. ANSYS, FORMFEM aj.

Komplexní řešení problému si žádá i experiment. Naměřené hodnoty mohou být použity pro stanovení okrajových podmínek (nepřímá úloha) nebo pro kontrolu modelu ochlazování. Tímto způsobem je zajištěno praktické ověření teoretických výsledků a může dojít k jejich zpřesnění a zobecnění. Pro měření vnitřních teplot je nutné do kolejnice instalovat termočlánky. Z hlediska přesnosti měření je potřeba dodržet metodické zásady:

- Instalace termočlánků do vzorku v izotermické rovině.
- Minimální narušení homogenity materiálu, tj. použít termočlánky s minimálním možným průměrem.
- Vhodný typ termočlánků (teplotní rozsah měření, odezva čidla, apod.).

### 3 Experimenty a výsledky

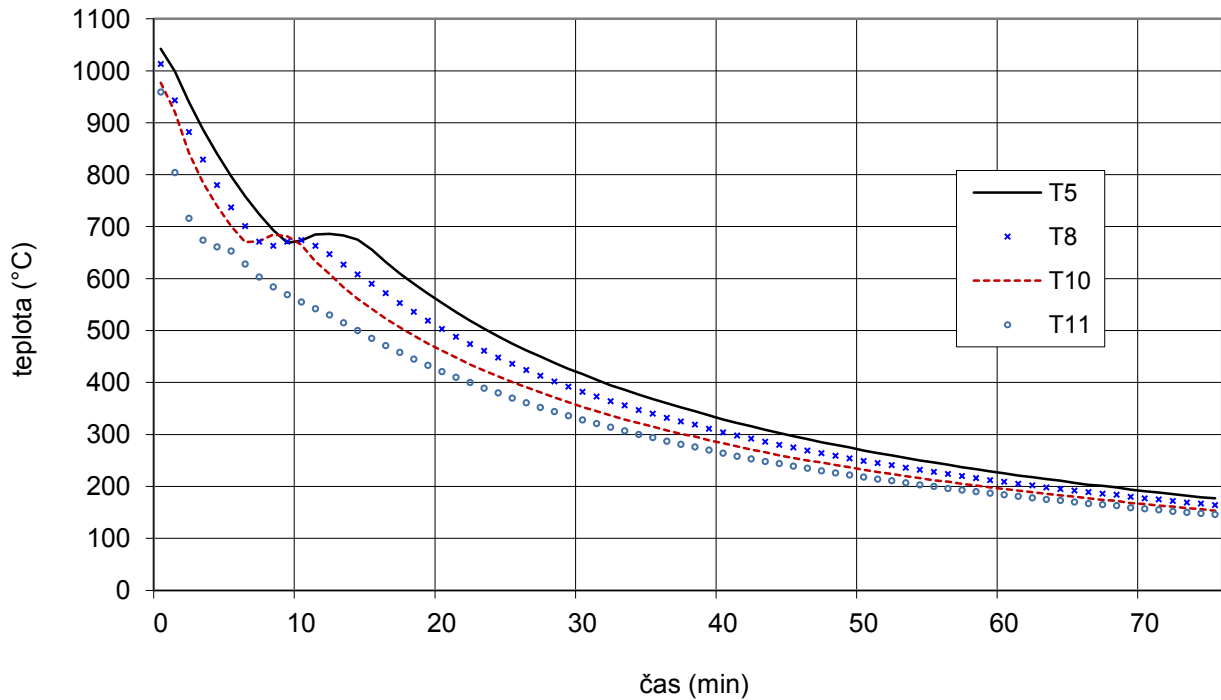
Pro experimentální měření se použila kolejnice typu UIC 54 z oceli o složení (hm.%): 0,735 %C, 0,9 %Mn, 0,367 %Si, 0,0014 %P, 0,016 %S, 0,05 %Cr, 0,03 %Ni, 0,005 %V, 0,003 %Mo, 0,06%Cu. Jelikož dodaný vzorek měl délku pouze 296 mm, byly čelní stěny kolejnice zaizolovány vláknitým materiálem Sibal.



Obr. 1 Umístění termočlánků.

Plášťové termočlánky typu K byly zabudovány do otvorů o průměru 3 mm a hloubce 50 mm. Schéma umístění všech 11 termočlánků je znázorněno na **Obr. 1**.

Termočlánky byly skrz izolační materiál vyvedeny do svorkovnice a odtud kompenzačním vedením do měřicí ústředny Omega OM-190. Rozlišení ústředny je 16 bitů, přesnost 0,5 %. Připravený vzorek kolejnice byl následně ohříván v plynové komorové peci. Po dosažení průměrné teploty vzorku 1000 °C byla kolejnice vytažena a postavena na ocelový rošt, kde volně chladla. Jednotlivé teploty byly ústřednou zaznamenávány s periodou 1 min [5]. Průběh teplot ve čtyřech vybraných místech kolejnice ukazuje **Obr. 2**.



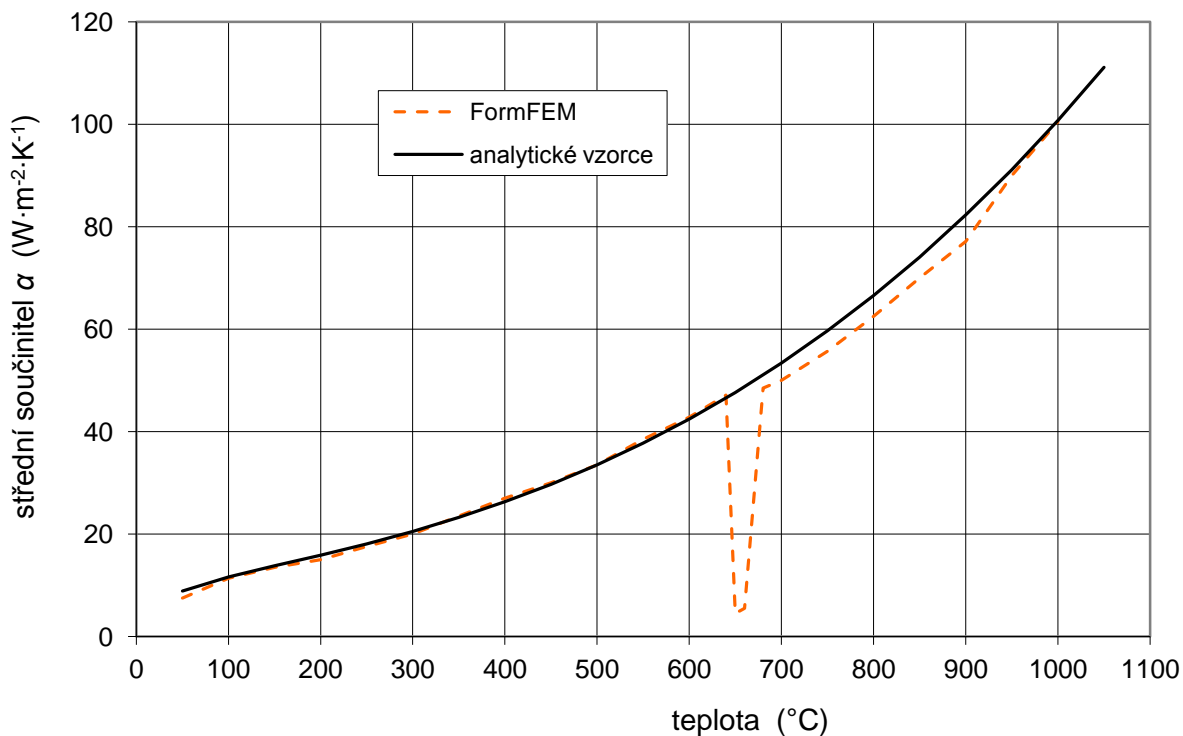
Obr. 2 Průběh teplot při ochlazování na vzduchu.

#### 4 Diskuze získaných výsledků

Naměřené průběhy odpovídají teoretickým předpokladům. Nejrychlejší pokles teploty vykázaly termočlánky T9 a T11 v patě kolejnice, kde má materiál tloušťku cca jenom 12 mm. Naopak nejpomalejší změna teploty se projevila na termočlátku T5, umístěném ve středu hlavy kolejnice. Obdobně pomalejší pokles teploty zaznamenal termočlánek T8 ve středu stojiny kolejnice. Obecně časové teplotní závislosti odpovídají umístění jednotlivých termočlánků, místa blíže k povrchu chladla rychleji. V rozmezí teplot 580 až 670 °C termočlánky zaznamenaly prodlevu nebo i mírné zvýšení teploty. To odpovídá fázové transformaci austenit – perlit, doprovázené uvolňováním latentního tepla, což souvisí se změnou plošně centrované na prostorově centrovanou krystalovou mřížku.

Experimentálně změřené teploty byly využity pro stanovení součinitele přestupu tepla  $\alpha$  prostřednictvím programu FormFEM. Řešená oblast byla pokryta trojúhelníkovou sítí tak, aby vybrané uzly sítě odpovídaly umístění jednotlivých termočlánků. Při simulaci byla uvažována závislost termofyzikálních vlastností materiálu na teplotě. Iterační postup řešení zahrnoval nejprve výpočet  $\alpha$  dle teoretických vztahů, poté generování teplotních křivek, srovnání vypočtených teplot s experimentálními hodnotami a následnou úpravu součinitele  $\alpha$ . Výsledkem je pak závislost středního součinitele přestupu tepla na teplotě - viz Obr. 3.

Mimo oblast fázové transformace je vidět velmi dobrá shoda mezi teoreticky vypočtenou a simulací stanovenou hodnotou  $\alpha$ . Rozdíl mezi oběma hodnotami se pohybuje v rozmezí -2,6 % až 6,7 %. Prudký pokles hodnoty  $\alpha$ , stanovený programem FormFEM kolem teploty 650 °C, souvisí se skutečností, že program neumožňuje do řešení zahrnout teplo fázové transformace.



Obr. 3 Srovnání hodnot součinitele přestupu tepla.

## 5 Závěr

V příspěvku je popsána metodika stanovení okrajových podmínek při chlazení kolejnic. Experimentální měření chladnutí se uskutečnilo na kolejnici s profilem UIC 54 z oceli 900A. S pomocí experimentálních dat a simulačního programu FormFEM byla iteračním postupem stanovena povrchová podmínka III. druhu, tj. hodnota součinitele přestupu tepla mezi chladnoucí kolejnici a okolím. Na základě dosažených výsledků (průběh teplot, součinitel  $\alpha$ ) lze provádět počítačovou simulaci chlazení a následně za pomoci ARA diagramů predikovat výslednou strukturu a mechanické vlastnosti kolejnic.

**Poděkování** Tento článek vznikl jako součást řešení projektu SP2012/28-FMMI VŠB TUO a projektu VEGA 1/0006/11.

## Literatura

- [1] SCHMIDOVÁ, E. Zvyšování užitečných vlastností kolejnicového materiálu. Brno: *Vědecké spisy VUT v Brně*, 2002. 33 s. ISBN 80-214-2209-2.
- [2] ZHAN, X., WANG, S. Research on the improvement of rail head hardening technology on Railway. In *Proceedings of the Eastern Asia Society for Transportation Studies*, vol. 5, pp. 263-271, 2005.
- [3] RÉDR, M., PŘÍHODA, M. Základy tepelné techniky. 1. vyd. Praha: SNTL, 1991. 680 s. ISBN 80-03-00366-0.
- [4] BROŽ, P., PROCHÁZKA, P. Řešení nelineárních úloh mechaniky metodou okrajových prvků. Praha: Grada, 1995. ISBN 80-7169-186-0.
- [5] TOMAN, Z., MAREK J., BABINEC, A., HORÁČEK, J. Teplotní pole a ochlazování při válcování kolejnic. *Výzkumná zpráva*. FMMI, VŠB-TU Ostrava, 2001.