

## Experimentální výzkum vysokotlakového ostříku okují

Zdeněk Hajkr<sup>1</sup>, Miroslav Příhoda<sup>1</sup>, Mária Čarnogurská<sup>2</sup>, Zdeněk Toman<sup>1</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** Příspěvek se zabývá možnostmi odstraňování okují z povrchu válcovaného materiálu pomocí hydraulického ostříku tlakovou vodou. Vliv ostříku na teplotní pole válcovaného materiálu byl experimentálně zjišťován na válcovací trati a to při ostříku sekundárních okují před vstupem předvalku do válcovací stolice. Naměřená data byla zpracována pomocí inverzní úlohy a získána tak Fourierova povrchová podmínka pro řešení teplotního pole materiálu.

### 1 Úvod

Současný vývoj kvalitativně nových jakostí válcovaných ocelí, zefektivňování procesů ohřevu materiálu, ale také proměnlivé složení pecní atmosféry, vedou k tvorbě okují, které jsou velmi tenké, přilnavé a z povrchu válcovaného materiálu těžko odstranitelné. Ostřík okují ovlivňuje jak teplotní pole vývalku, tak i výslednou kvalitu jeho povrchu. Řešení teplotního pole není možné bez znalosti součinitele přestupu tepla z povrchu materiálu do okolí. Jeho zjištění je komplikovaný proces, založený buď na metodě tepelné bilance, resp. na řešení inverzní úlohy.

### 2 Metodika stanovení součinitele přestupu tepla

Znalost teplotního pole válcovaného materiálu je stále velmi aktuální, protože v reálném provozu umožňuje optimalizovat válcovací proces z hlediska rozměrových tolerancí, výsledné struktury a povrchové kvality vývalku. Při řešení kinetiky teplotního pole válcovaného materiálu lze obecně použít dvě metody, *analytickou* nebo *numerickou*. Analytické metody jsou použitelné pouze v případech, kdy se přímá úloha řeší pro jednoduché podmínky jednoznačnosti, jinak je potřeba aplikovat některou z numerických metod (diferenční, konečných prvků, konečných objemů, hraničních prvků).

Stanovení součinitele přestupu tepla  $\alpha$  z experimentálně změřených teplot provalku se řadí mezi inverzní, tedy matematicky nekorektní úlohy. V našem případě byla hodnota  $\alpha$  vypočtena pomocí Beckova minimalizačního principu [1]. Beckův algoritmus je založen na hledání takové hodnoty součinitele přestupu tepla, která minimalizuje střední kvadratickou odchylku mezi vypočtenou a experimentálně změřenou teplotou v daném místě. Výpočet probíhá iteračně a je ukončen v okamžiku, kdy je splněna podmínka povolené maximální odchylky mezi novým a předcházejícím řešením.

K orientačnímu stanovení součinitele přestupu tepla možno v prvním přiblížení použít i metody tepelné bilance, jejíž podstata je následující. Celkové množství tepla odvedené při ostříku je dáno rovnicí

$$\Delta Q = \sum Q_{\text{pred}} - \sum Q_{\text{po}} \quad (\text{J}) \quad (1)$$

kde  $\Delta Q$  je celkové množství tepla odvedené ostřikem (J),  $\Sigma Q_{\text{pred}}$  je součet tepla v jednotlivých vrstvách materiálu před ostřikem (J) a  $\Sigma Q_{\text{po}}$  představuje součet tepla v jednotlivých vrstvách materiálu po ostřiku (J).

Množství tepla před ostřikem se vyjádří vztahem

$$\Sigma Q_{\text{pred}} = \Sigma m \cdot c_p \cdot t_{i,\text{pred}} \quad (\text{J}) \quad (2)$$

kde  $m$  je hmotnost válcovaného materiálu (kg),  $c_p$  - měrná tepelná kapacita ( $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ),  $t_{i,\text{pred}}$  - průměrná teplota v jednotlivých vrstvách před ostřikem a stanoví se podle vztahu  $t_{i,\text{pred}} = (t_i + t_{i+1})/2$  ( $^{\circ}\text{C}$ ). Obdobným způsobem se určí množství tepla po ostřiku.

Pro teplo odvedené ostřikem lze z teorie přenosu tepla uvést vztah

$$\Delta Q = \alpha \cdot (t_0 - t_v) \cdot S \cdot \tau_{\text{ostr}} \quad (\text{J}) \quad (3)$$

kde  $\alpha$  je součinitel přestupu tepla ( $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ ),  $t_0$  je teplota povrchu před ostřikem,  $t_v$  je teplota ostřikové vody,  $S$  je ostřikovaná plocha ( $\text{m}^2$ ) a  $\tau_{\text{ostr}}$  je doba ostřiku (s)

Pomocí vztahů (1) a (4) se součinitel přestupu tepla vyjádří ve tvaru

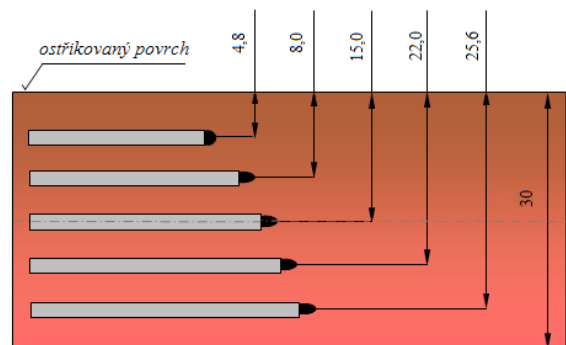
$$\alpha = \frac{\Sigma Q_{\text{pred}} - \Sigma Q_{\text{po}}}{(t_0 - t_v) \cdot S \cdot \tau_{\text{ostr}}} \quad (\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}) \quad (4)$$

### 3 Popis experimentu

Stanovení součinitele přestupu tepla, realizované v poloprovozních podmínkách, nemá takovou přesnost, jako měření v podmínkách laboratorních. Umožňuje však získat teplotní data blízká reálnému procesu ostřiku okují. Pro experimentální výzkum byl vybrán tlustý plech (vývalek) o rozměrech 400 x 400 x 30 mm z materiálu jakosti ČSN 11 375 o chemickém složení 0,20% C, max. 1,4 % Mn, 0,045 % P, 0,045 % S, 0,009 % N. V plechu (**Obr. 1**) byly, podle schématu na **Obr. 2**, instalovány plášťované termočlánky typu K s uzemněným koncem o průměru 3 mm. Vzdálenosti termočlánků od ostřikovaného povrchu byly 4,8 mm, 8 mm, 15 mm, 22 mm a 25,6 mm. Hloubky uložení termočlánků ve vzorku byly ověřeny ultrazvukovým přístrojem Kraut Kramer USN-2 [2].



**Obr. 1** Pohled na experimentální vývalek.

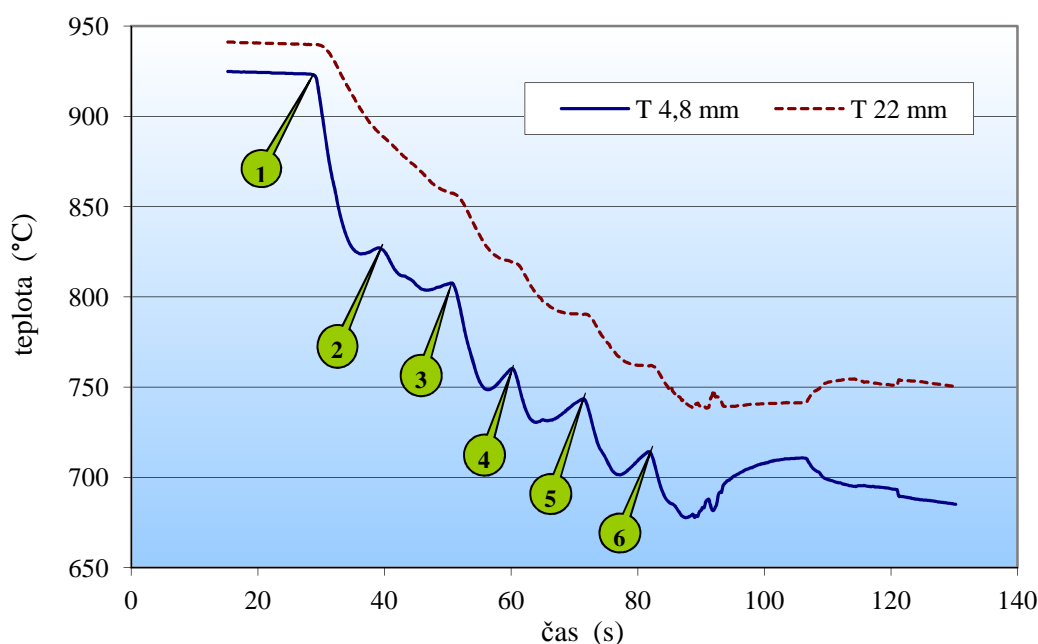


**Obr. 2** Schéma umístění termočlánků.

Termočlánky byly vyvedeny vyfrézovanou drážkou na povrch zkušební plechu, kde je před mechanickým účinkem tlakové vody chránila silnostěnná trubka. Signály z termočlánků byly snímány s periodou 0,25 s a ukládány do paměti měřicí ústředny.

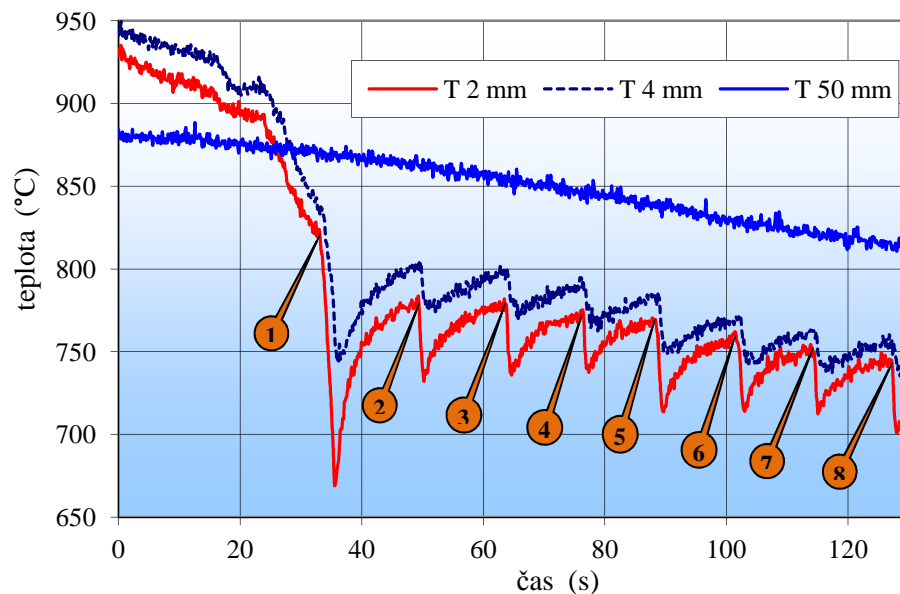
Zkušební vývalek, ohřátý v narážecí peci na teplotu 1000 °C, byl položen na pomocnou bramu o rozměrech 2360 x 1500 x 240 mm. Poté se uskutečnilo celkem šest ostřiků, při nichž se zkušební vzorek pod tryskami pohyboval rychlostí 1 m·s<sup>-1</sup>. V činnosti byly pouze horní trysky sekundárního ostřiku okují. Během experimentu byly z pěti instalovaných termočlánků dva poškozeny. Šlo o termočlánky umístěné v hloubce 8 mm a 25,6 mm.

Z grafického zobrazení průběhu teplot v hloubkách 4,8 mm a 22 mm (**Obr. 3**), je zřejmé, že k výraznějším změnám teploty dochází pouze ve vzdálenosti 4,8 mm pod povrchem. S rostoucí vzdáleností od ochlazovaného povrchu se informace o teplotních změnách vlivem ostřiku „vytrácí“, dominuje pozvolný pokles teploty. Data získaná „vzdálenějšími“ termočlánky jsou pro výpočet součinitele přestupu tepla inverzní metodou prakticky nepoužitelná. Byl učiněn pokus alespoň o orientační stanovení součinitele přestupu tepla pomocí bilanční metody. Z poklesu teplot při prvním ostřiku bylo určeno množství tepla odvedeného při ostřiku okují podle vztahu (1). Pro vývalek, pohybující se rychlostí 1,0 m·s<sup>-1</sup> a aktivní délku ostřikované plochy 0,2 m, vychází doba ostřiku  $\tau_{ostr} = 0,2$  s. Z těchto hodnot určený součinitel přestupu tepla má hodnotu 21750 W·m<sup>-2</sup>·K<sup>-1</sup>.



**Obr. 3** Průběh teplot během 1. experimentu.

Na základě zkušeností z prvního měření byl experiment opakován na novém vzorku téže kvality, ale s dvojnásobnou tloušťkou. Druhé měření teplot bylo provedeno s modelovým vývalkem o rozměrech 400 x 400 x 60 mm. Příprava termočlánků a způsob jejich vyvedení k snímací aparatuře byly shodné jako při prvním měření. Ve vývalku bylo nainstalováno celkem 8 termočlánků typu K. Dva ve vzdálenosti 2 mm od horního povrchu a po jednom v hloubkách 3 mm, 4 mm, 5 mm, 7,5 mm, 10 mm a 20 mm. Perioda snímání a zaznamenávání dat byla zkrácena na 0,134 s. Změny teplot během osmi ostřiků ve třech vybraných bodech vývalku jsou znázorněny na **Obr. 4**.



Obr. 4 Průběh teplot během 2. experimentu.

#### 4 Diskuze získaných výsledků

Hodnoty teplot v jednotlivých hloubkách pod povrchem ostříkovaného vývalku, získané při druhém experimentu, byly zpracovány prostřednictvím softwaru IHCP1D. Software, vycházející z Beckova minimalizačního principu, byl vytvořen v Beck Engineering Consultants Company [3]. Uvedeným algoritmem byl vypočten součinitel přestupu tepla  $\alpha$  pro první tři ostříky. Jeho průměrná hodnota byla  $18460 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ . Stanovené hodnoty součinitele přestupu tepla byly zpětně využity při kontrolním výpočtu průběhu teplot ve sledovaném vývalku. Na základě porovnání naměřených a vypočtených hodnot lze konstatovat, že rozdíl teplot se pohyboval v rozmezí od 10 do 15 K.

#### 5 Závěr

Znalost teplotního pole válcovaného materiálu je nutným předpokladem pro dokonalé zvládnutí technologie řízeného válcování. Vysokotlaký ostřík okují před vstupem do válcovací stolice může výrazně snížit teplotu provalku. Na základě popsané metodiky experimentálního měření a numerických výpočtů lze získat konkrétní hodnoty povrchové podmínky úlohy, která řeší kinetiku teplotního pole tvářeného materiálu.

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

#### Literatura

- [1] BECK, J. V., BLACKWELL, B., ST. CLAIR, C. R., jr. Inverse Heat Conduction. Ill-Posed Problems. New York etc., J. Wiley & Sons 1985. ISBN 0-471-08319-4.
- [2] HAJKR, Z., TOMAN, Z. Vlastnosti vrstvy okují a mechanismus jejich odstraňování vodním paprskem. In *Sborník semináře Ostřík okují*. HYDROSYSTEM group, a.s. Olomouc. Ostrava, 21. 6. 2001, s. 9-17.
- [3] [www.beckeng.com](http://www.beckeng.com).