

URČENÍ TERMOFYZIKÁLNÍCH VLASTNOSTÍ OKUJÍ NA OCELI PRO VYSOKÉ TEPLoty

TOMÁŠ ONDRUCH

ABSTRAKT. Příspěvek seznamuje čtenáře s problematikou bakalářské práce řešené studentem oboru Matematické inženýrství na FSI VUT v Brně ve spolupráci s Laboratoří přenosu tepla a proudění¹. Cílem textu je poukázat na využití matematického aparátu při řešení reálné technické úlohy z oblasti přenosu tepla. Zde matematika poskytuje nástroje jak pro popis zkoumaných fyzikálních jevů, tak i pro analýzu dat a vyhodnocení kvality vypočítaných výsledků.

1. ÚVOD

Při výrobě oceli a během procesů jejího zpracování za vysokých teplot je ocel běžně vystavena oxidačnímu prostředí. Za takových podmínek dochází na jejím povrchu k oxidaci železa a následnému vzniku vrstev okují. Jejich význam je důležitý jak z hlediska dosažení požadované kvality oceli, tak i pro optimalizaci dílčích procesů zpracování, zejména postupného chlazení ocelových produktů a jejich válcování.

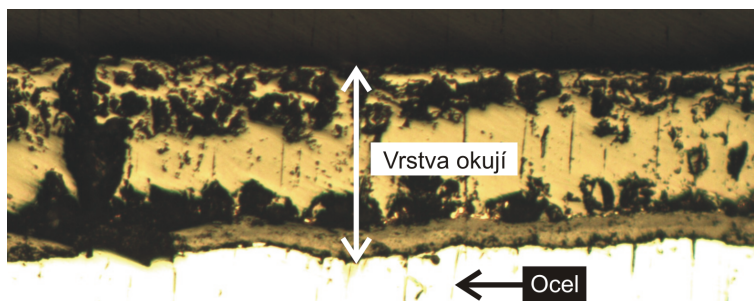
Vliv okují by tedy rozhodně neměl být zanedbáván a jejich výzkumu by se měla věnovat patřičná pozornost. Z důvodu značné závislosti struktury okují na parametrech oxidačního prostředí a složení oceli je však zkoumání jejich vlastností velmi složité. K této obtíži přispívá také výrazná nehomogenita, křehká struktura a obecně proměnlivá poréznost vrstvy okují. Mikrofotografie zokujeného povrchu oceli je přiložena na obrázku 1.

Bakalářská práce se zabývá určením tepelné difuzivity α a součinitele tepelné vodivosti λ vrstvy okují na oceli. Řešení úlohy zahrnuje experimentální část s využitím měřicího aparátu pro tzv. laserovou zábleskovou metodu, která je velmi vhodná zejména pro měření vzorků za vysokých teplot přesahujících 600 °C. Získané výsledky jsou počítačově zpracovány a v dalším postupu srovnány s výstupy konečněprvkového numerického modelu, který simuluje provedené měření. Výsledky získané těmito dvěma vědeckými přístupy lze následně porovnat a s pomocí metody odezvové plochy založené na principech regresní analýzy určit hodnoty hledaných termofyzikálních vlastností.

2010 MSC. Primární 80A20; Sekundární 00A06.

Klíčová slova. Okuje, termofyzikální vlastnosti, laserová záblesková metoda, diferenciální rovnice vedení tepla, metoda odezvové plochy.

¹Vedoucím bakalářské práce autora byl Michal Pohanka z Laboratoře přenosu tepla a proudění FSI VUT v Brně.



Obrázek 1. Mikrofotografie vrstvy okují na povrchu oceli.

2. ZÁKLADY PŘENOSU TEPLA

Nedílnou součástí procesů výroby a zpracování oceli je přenos tepla. Z hlediska fyzikální podstaty dějů lze u něj rozlišovat tři základní mechanismy: vedení, proudění a záření. V hutnickém průmyslu i v řešeném problému souvisejícím s určením termofyzikálních vlastností zastává nejvýznamnější roli přenos tepla vedením, který lze formálně popsat pomocí diferenciální rovnice vedení tepla, známé také jako rovnice tepelné difuze.

2.1. Diferenciální rovnice vedení tepla

Pro základní případ jednorozměrné úlohy nestacionárního vedení tepla, například v tenké tyči nebo skrze rovinou stěnu, lze diferenciální rovnici vedení tepla zapsat ve tvaru

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\alpha \frac{\partial T}{\partial x} \right) + q(x, t), \quad (2.1)$$

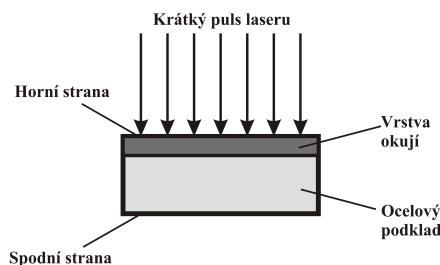
kde $T = T(x, t)$ je hledaná funkce popisující teplotu ve zkoumaném tělese v místě se souřadnicí x a čase t , člen $q(x, t)$ reprezentuje vnitřní zdroje tepla a součinitel α se nazývá tepelná difuzivita. Při řešení úlohy vedení tepla je rovnice dále doplněna o počáteční podmínku a vhodné okrajové podmínky.

Pro fyzikální vyjádření tepelné difuzivity platí vztah $\alpha = \frac{\lambda}{\rho c}$, kde člen λ na pozici čitatele představuje součinitel tepelné vodivosti, jmenovatel vyjadřuje součin hustoty ρ a měrné tepelné kapacity c materiálu. Z hlediska interpretace vyjadřuje tepelná difuzivita schopnost látky vyrovnávat rozdílné teploty při neustáleném šíření tepla vedením v homogenním prostředí. Oproti tomu součinitel tepelné vodivosti λ charakterizuje schopnost látky vést teplo. Určení číselných hodnot těchto dvou termofyzikálních vlastností se v praxi provádí experimentálně. V případě měření zokujených vzorků za vysokých teplot je vhodným postupem použití tzv. laserové zábleskové metody.

3. LASEROVÁ ZÁBLESKOVÁ METODA

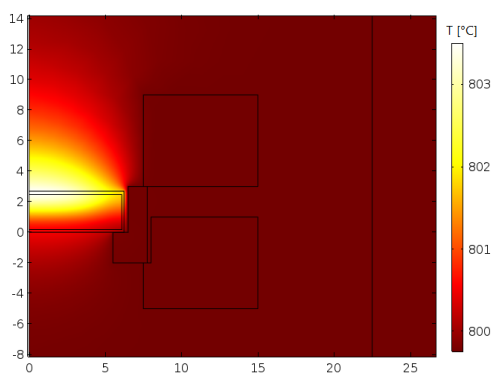
V Laboratoři přenosu tepla a proudění bylo provedeno měření zokujených vzorků oceli 54SiCr6 pomocí měřicího zařízení pro laserovou zábleskovou metodu. Její princip spočívá v ozáření malého vzorku tvaru disku výkonným pulsním laserem, jehož paprsek dopadá na horní stranu měřeného vzorku a způsobí jeho zahřátí. Odezva na spodní straně vzorku odpovídající postupnému nárůstu teploty je následně měřena vysoce citlivým infračerveným senzorem a pomocí systému pro sběr dat zaznamenávána do paměti počítače. Z růstu křivky odezvy a známých rozměrů vzorku lze pak v případě měření homogenních vzorků určit hodnotu tepelné difuzivity a součinitele tepelné vodivosti materiálu.

Ozáření nehomogenního vzorku vrstvy okují na oceli je graficky znázorněno na obrázku 2. V takovém případě je však samotná laserová záblesková metoda nedostačující, neboť neumožňuje určení termofyzikálních vlastností okují jakožto dílčí vrstvy zkoumaného vzorku. Z důvodu křehké struktury okují navíc nelze tuto vrstvu oxidů od substrátu oceli pro účely měření oddělit. Vhodné řešení problému nabízí využití numerické simulace.



Obrázek 2. Ozáření zokujeného vzorku.

4. NUMERICKÝ MODEL



Obrázek 3. Teplotní pole v oblasti držáku pece.

Ve vývojovém prostředí programu COMSOL Multiphysics v 5.2a byl vytvořen konečněprvkový numerický model měřicího zařízení, který simuluje provedení experiment laserové zábleskové metody. Model zahrnuje geometrii elektrické pece spolu se zokujeným vzorkem uchyceným v držáku uvnitř pece a simuluje časově závislý přenos tepla probíhající po ozáření vzorku pulzem laseru. Žádaným výstupem numerického výpočtu je podobně jako v případě reálného měření konečná posloupnost hodnot popisující teplotní odezvu na spodní straně ozářeného vzorku. Na obrázku 3 je zachyceno vypočítané teplotní

pole v oblasti držáku pece bezprostředně po simulovaném ozáření vzorku při počáteční teplotě 800 °C.

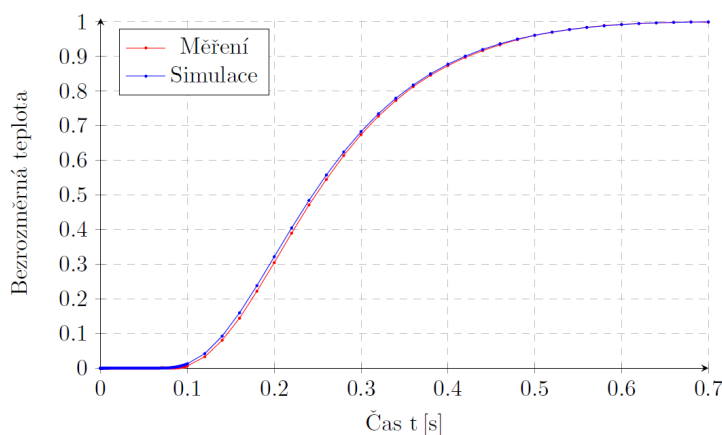
5. VÝPOČET TERMOFYZIKÁLNÍCH VLASTNOSTÍ

Pro určení termofyzikálních vlastností zkoumané vrstvy okují byly srovnávány teplotní odezvy na spodní straně vzorku získané z numerického modelu s odezvou naměřenou infračerveným snímačem při experimentu. Konkrétně byly sledovány tvary křivek v časovém rozmezí od vyzáření pulsu laseru až po bod maxima křivky.

Účelem tohoto procesu bylo minimalizovat funkcionál S představující součet čtverců odchylek hodnot získaných z numerického modelu vůči hodnotám naměřeným při experimentu. Nalezení minima pak přímo vede na určení hledané dvojice termofyzikálních vlastností okují. Matematicky lze úlohu zapsat ve tvaru

$$(\hat{\alpha}, \hat{\lambda}) = \underset{\alpha, \lambda}{\operatorname{argmin}} S(\alpha, \lambda) = \underset{\alpha, \lambda}{\operatorname{argmin}} \sum_{t=0}^n (U_t - T_t(\alpha, \lambda))^2,$$

kde U_t jsou data získaná z experimentu, T_t jsou hodnoty získané ze simulace. Čas $t = 0$ označuje okamžik ozáření vzorku pulsem laseru, $t = n$ se pak vztahuje k bodu, kdy U_t nabývá své maximální hodnoty. Nutno poznamenat, že jak posloupnost diskretních hodnot U_t , tak i T_t je pro účely vzájemného srovnávání křivek potřeba přeskálovat do bezrozměrného tvaru v rozsahu $\langle 0, 1 \rangle$. Graficky je myšlenka porovnávání křivek ve smyslu metody nejmenších čtverců zachycena na obrázku 4.



Obrázek 4. Princip srovnávání tvaru křivek ve smyslu metody nejmenších čtverců.

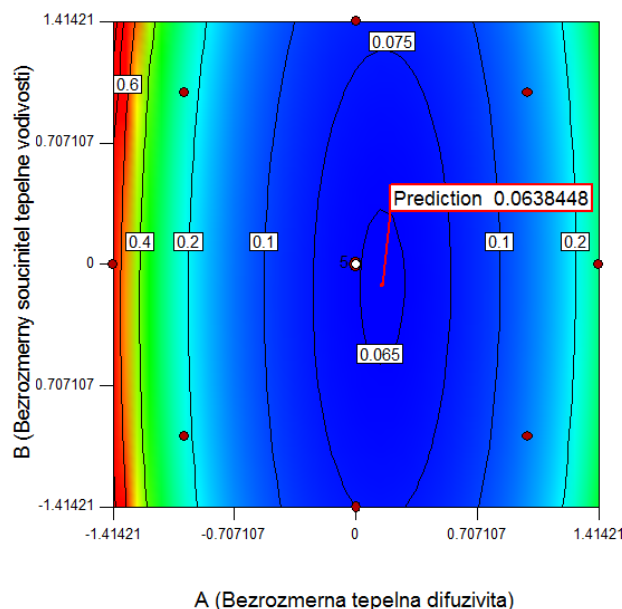
5.1. Metoda odezvy plochy

Základní myšlenka řešení úlohy využívá fakt, že volbou dvojice parametrů (α, λ) v nastavení numerického modelu lze měnit výstupní hodnoty T_t numerického

výpočtu, a tedy i výsledný součet čtverců odchylek. Metoda odezvy plochy představuje efektivní nástroj, který umožňuje úlohu řešit při provedení poměrně nízkého počtu simulačních výpočtů, přičemž testovací dvojice parametrů (α, λ) jsou voleny systematicky podle tzv. plánu experimentu. Přitom se využívá předpokladu, že empirický model vlivu vstupních proměnných modelu na výstupní proměnnou můžeme aproximovat vhodnou matematickou funkcí ve smyslu nejmenších čtverců.

5.2. Výpočet termofyzikálních vlastností

Ve statistickém software Design-Expert 10 určeném pro návrh a analýzu experimentu byla použita metoda odezvy plochy pro nalezení optimální dvojice parametrů $(\hat{\alpha}, \hat{\lambda})$ minimalizující funkcionál S pro součet čtverců odchylek naměřených a simulovaných hodnot na křivce odezvy. Pro regresi byl v uživatelském rozhraní programu zvolen polynomiální kvadratický model. Program po provedení výpočtu poskytl uživateli číselné hodnoty nalezených termofyzikálních vlastností i grafickou reprezentaci nalezené odezvy plochy, která je znázorněna formou konturového diagramu na obrázku 5. Výstup rovněž zahrnoval analýzu rozptylu (ANOVA), která umožňuje vyhodnotit kvalitu vytvořeného modelu a případně identifikovat jeho nedostatky. Tyto poznatky jsou prezentovány a okomentovány v textu přílohy vypracované bakalářské práce.



Obrázek 5. Konturový diagram nalezené odezvy plochy.

6. DISKUZE A ZÁVĚR

Vypočítané hodnoty tepelné difuzivity $\hat{\alpha} = 4,74 \cdot 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{s}$ a součinitele tepelné vodivosti $\hat{\lambda} = 0,37 \text{ W/m K}$ vrstvy okují pro měření při teplotě 800°C byly v závěru srovnány s hodnotami z dalších dostupných publikací. Zejména nezanedbatelná míra poréznosti zkoumaných okujů, u kterých vzduchové póry tvoří až 37% celkového objemu, je pravděpodobně hlavním důvodem, že nalezené hodnoty jsou ve srovnání s dostupnými daty značně nižší. Vyhodnocení míry vlivu poréznosti okujů na výsledky výpočtu jejich termofyzikálních vlastností nabízí prostor pro navazující pokrok v této oblasti výzkumu.

Tomáš Ondruch, Ústav matematiky, Fakulta strojního inženýrství, Vysoké učení technické v Brně, Technická 2, 616 69 Brno, Česká republika,
e-mail: tomas.ondruch@vutbr.cz