

In-line tepelné zpracování ocelových profilů a trubek

In-line Heat Treatment of Profiles and Tubes

Ing. Martin Chabičovský¹, prof. Ing. Jaroslav Horský, CSc.¹, Ing. Milan Hnízdil, Ph.D.¹, Ing. Marek Stránský¹

¹Laboratoř přenosu tepla a proudění, Fakulta strojního inženýrství, Vysoké učení technické v Brně, Technická 2896/2, 616 69 Brno, Česká republika

In-line tepelné zpracování válcovaných materiálů se stále častěji používá ve válcovnách. Při in-line tepelném zpracování je dosaženo požadované struktury materiálu bez nutnosti dohřívání. Tento článek se zabývá postupem návrhu chladicí sekce pro získání požadované struktury a mechanických vlastností materiálu.

Dvě experimentální zařízení, používaná ke studiu chlazení ocelových vzorků, byla postavena v Laboratoři přenosu tepla a proudění (LPTP), VUT v Brně. První experimentální zařízení umožňuje simulovat různé režimy chlazení a vyhodnotit finální strukturu testovaných vzorků, které jsou osazeny sadou termočlánků zaznamenávajících teplotu ve vzorku v průběhu chlazení. Druhé experimentální zařízení slouží pro návrh chladicích sekcí, které zajistí požadovaný postup tepelného zpracování a požadovanou výslednou strukturu. Výsledkem je také stanovení průběhu součinitele přestupu tepla na studovaném povrchu jako výsledek inverzní úlohy. Jsou uvedeny příklady návrhu chladicí sekce na reálných vzorcích trubek a kolejnic.

Klíčová slova: tepelné zpracování; součinitel přestupu tepla; trubka; kolejnice

An in-line heat treatment of rolled materials is becoming frequently used by hot rolling plants. This method achieves the required material structure without the necessity of reheating.

This paper describes a design procedure of cooling sections for obtaining the demanded structure and mechanical properties.

The first step is the search of the best cooling mode for steels, for which this is not yet known. The second step is to obtain a selection of technical means in order to guarantee obtaining the prescribed cooling rates. Nozzle configurations and cooling parameters are selected and controllability of the cooling section is checked. The final step of the design is a laboratory test using a full size sample simulating - cooling at the plant.

Experimental stands, applied for the cooling study of steel samples, were built at the Brno University of Technology. The first experimental stand makes it possible to simulate a variety of cooling modes and evaluate the final structure of the tested samples, which are instrumented by a set of thermocouples indicating the temperature history of the tested material. The second experimental stand is a tool for the design of the cooling sections, which can ensure obtaining the demanded heat treatment procedure and demanded final structure. The heat transfer coefficient history at the surface is obtained as an output of the inverse task.

The design of cooling sections used for heat treatment of tubes and rails is very extensive work. It utilizes numerical modelling, laboratory measurement and also pilot mill tests. Design based on laboratory measurement minimizes the amount of expensive experimentation performed directly at the plant. It eliminates potential errors and enables adjustment.

Key words: heat treatment; heat transfer coefficient; tube, rail

Mikrostruktura, povaha zrn, velikost zrn a jejich složení určují celkové mechanické vlastnosti oceli. Tepelné zpracování poskytuje účinný způsob ovlivnění vlastností oceli pomocí řízeného ochlazování.

Způsob tepelného zpracování závisí na mnoha aspektech. Jedním z nejdůležitějších parametrů je množství produkce. Dalším důležitým parametrem je velikost výrobků.

Příspěvek se zaměřuje na velkovýrobu, jako je chlazení dlouhých výrobků na výstupu z válcovací stolice,

chlazení kolejnic, trubek a speciálních profilů. Tento typ tepelného zpracování se nazývá in-line tepelné zpracování a začíná být používáno ve válcovnách. Tímto způsobem se dosahuje požadované struktury materiálu bez nutnosti dohřívání. Navrhování chladicích sekcí pro tepelné zpracování je iterativní postup zahrnující několik důležitých kroků. Nejprve se odhadne požadovaná intenzita chlazení, která povede k získání potřebné struktury a mechanických vlastností. K tomu lze orientačně využít diagram anizotermického rozpadu austenitu (ARA diagram) a numerickou simulaci chlazení. To vede k odhadu potřebné chladicí intenzity

(součinitele přestupu tepla). S využitím databáze chladicích intenzit trysek získané experimentálním měřením (součinitel přestupu tepla při daném průtoku a tlaku pro různé typy a konfigurace trysek) je vybrána vhodná tryska a potřebný tlak vody. Dále je na malém vzorku z voleného materiálu testována funkce vybrané trysky a je ověřeno, zda je po tepelném zpracování dosaženo požadované struktury a mechanických vlastností. V případě, že není dostupný ARA diagram pro daný materiál, či není docíleno požadovaných mechanických vlastností nebo struktury, následuje zkoušení různých konfigurací trysek (velikost trysky, tlak vody a další parametry, dokud se nedocílí požadované struktury a mechanických vlastností. Z laboratorních experimentů jsou získány okrajové podmínky tepelného zpracování a ty jsou testovány pomocí numerického modelu [1].

Po nalezení požadovaných parametrů chlazení je navržena chladicí sekce tak, aby odpovídala požadovaným chladicím intenzitám a nedocházelo k nerovnoměrnému chlazení. Navržené optimální chlazení je pak testováno na vzorku reálných rozměrů a požadovaná struktura a materiálové vlastnosti jsou laboratorně ověřeny.

1. Experimentální stanovení intenzity sprchového chlazení a vytvoření databáze chladicích intenzit trysek

Pro výběr vhodné trysky a její konfigurace pro experimenty na tepelné zpracování je potřeba znát intenzitu chlazení různých trysek a jejich konfigurací. To vyžaduje proměřit několik trysek a jejich různé konfigurace, a vytvořit tak databázi intenzit chlazení trysek. Dále bude popsán postup, kterým se získá tato databáze.

Intenzita sprchového chlazení je funkcí několika parametrů, jako je typ trysky, průtok a tlak vody [2, 3], teplota vody [4], teplota povrchu chlazeného materiálu, kvalita povrchu [5, 6] a rychlost pohybu chlazeného materiálu. Dosud není k dispozici žádná výpočetní metoda pro predikci chladicí intenzity, která využívá všech uvedených parametrů. Experimentální měření je tedy jediným způsobem, jak přesně stanovit intenzitu sprchového chlazení. Stanovení intenzity sprchového chlazení se skládá z několika kroků: příprava experimentu, experimentální měření, výpočet okrajových podmínek a vyhodnocení vypočtených a laboratorně stanovených výsledků.

1.1 Experiment

Experimentální postup začíná výrobou zkušebního vzorku a instalací termočlánků do zkušebního vzorku. Zkušební vzorek je upevněn na experimentálním zařízení, kde je ohříván na požadovanou teplotu. Po zahřátí vzorku na požadovanou teplotu je nastaven požadovaný tlak či průtok vody v chladicí sekci tvořené

tryskami a je spuštěn záznam teplot termočlánků. Vzorek, připojený k pohyblivému vozíku, opakovaně prochází chladicí sekci, dokud není dostatečně zchlazen.

1.2 Výpočet okrajové podmínky

Ze změřených teplot jsou použitím inverzní úlohy vedení tepla vypočteny časově závislé okrajové podmínky: součinitel přestupu tepla, povrchová teplota a hustota tepelného toku. Pro výpočet je použit Beckův sekvenční přístup [7, 8]. Tato metoda používá sekvenční odhad časově proměnných okrajových podmínek a dopředných časových kroků. První součet čtverců chyb je vypočítán s použitím f dopředných časových kroků, kdy změřené teploty T_i^* jsou porovnány s vypočtenými teplotami T_i v aktuálním čase m :

$$SSE = \sum_{i=m+1}^{m+f} (T_i^* - T_i)^2 \quad (1)$$

Teploty T_i jsou vypočteny přímým výpočtem, např. metodou konečných diferencí, metodou konečných prvků anebo metodou konečných objemů. Tepelný tok s povrchu q v čase m je možné vypočítat minimalizací rovnice (1), za použití lineárních minimalizačních metod:

$$q^m = \frac{\sum_{i=m+1}^{m+f} (T_i^* - T_i|_{q^m=0}) \zeta_i}{\sum_{i=m+1}^{m+f} (\zeta_i)^2} \quad (2)$$

kde $T_i|_{q^m=0}$ jsou teploty v místě termočlánku, které byly vypočteny přímým výpočtem za použití dříve vypočtených tepelných toků bez q^m . Parametr ζ_i je citlivost snímače s termočlánkem v časovém indexu i na tepelný tok v čase m . Fyzikálně tento koeficient citlivosti značí zvýšení teploty v termočlánku na jednotku tepelného toku na povrchu. Koeficient citlivost snímače je definován jako

$$\zeta_i = \frac{\partial T_i}{\partial q^m} \quad (3)$$

Součinitel přestupu tepla (α) lze vypočítat z povrchové teploty a tepelného toku s povrchu q_m :

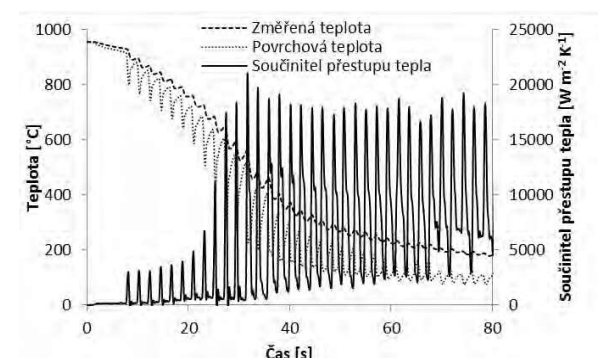
$$\alpha^m = \frac{q^m}{T_\infty^m - (T_0^m + T_0^{m-1})/2} \quad (4)$$

T_∞^m je teplota okolí.

1.3 Vyhodnocení experimentálních výsledků

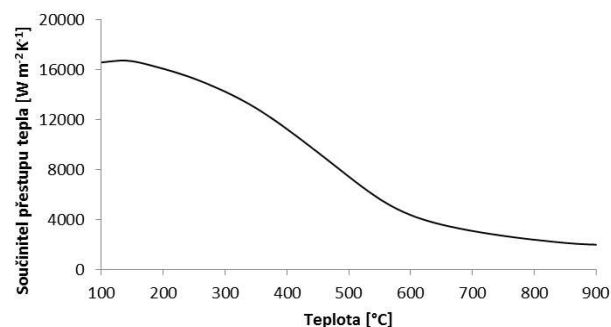
Změřená teplota je použita jako vstup pro inverzní úlohu vedení tepla, jejímž výstupem je časově závislá povrchová teplota, tepelný tok a součinitel přestupu tepla (obr. 1). Z těchto dat se získá závislost součinitele přestupu tepla na teplotě povrchu a poloze v chladicí sekci. Průměrná hodnota součinitele přestupu tepla přes polohu v chladicí sekci je znázorněna na obr. 2. Zde jsou vidět tři rozdílné oblasti chlazení. První oblast je pro

povrchové teploty vyšší než je Leidenfrostova teplota (cca 700 °C). V této oblasti je povrch pokryt parní vrstvou, která snižuje tepelný tok s povrchu do okolí. Druhá oblast nastává s poklesem povrchové teploty pod Leidenfrostovu teplotu. Dochází k postupnému rozpadu parní vrstvy, což vede k prudkému nárůstu součinitele přestupu tepla. Při teplotě 400 °C dojde k zániku parní vrstvy a nastává maximum tepelného toku. Od této teploty nebrání parní vrstva pronikání kapek od ostříku k chlazenému povrchu. Mezi touto teplotou a teplotou 100 °C se nachází třetí oblast s vysokou hodnotou součinitele přestupu tepla. V této oblasti dochází k chlazení kombinací bublinového varu a nucené konvekce od ostříku. Díky velké intenzitě sprchového ostříku nedochází k typickému poklesu hodnoty součinitele přestupu tepla, jako je tomu při chlazení vnořením, kde přenos tepla probíhá jen v důsledku varu.



Obr. 1 Ukázka změřených časově závislých teplot, vypočtených povrchových teplot a součinitele přestupu tepla

Fig. 1 Example of measured temperature, computed surface temperature and heat transfer coefficient depending on time



Obr. 2 Závislost průměrného součinitele přestupu tepla na povrchové teplotě

Fig. 2 Dependence of the average heat transfer coefficient on the surface temperature

2. Nalezení optimálního chladicího režimu

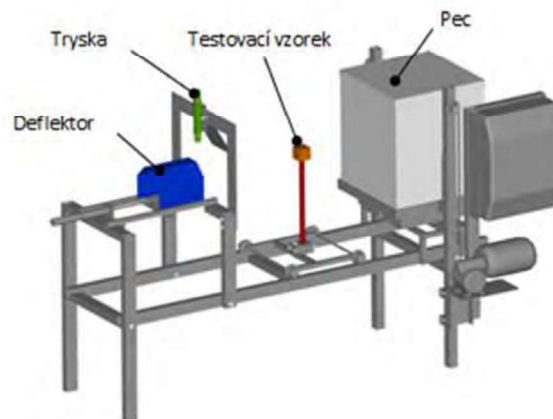
Pro získání požadovaných mechanických vlastností finálního produktu je nezbytné dodržení odpovídajícího chladicího režimu. Prvotní informaci o potřebném ochlazovacím režimu může poskytnout ARA diagram a numerická simulace chlazení. V případě, že ARA diagram není dostupný pro daný materiál, je nutné stanovit odpovídající ochlazovací režim experimentálně. Experiment též může posloužit jako validace či zpřesnění odhadu pomocí ARA diagramu.

Testy v průmyslových podmínkách, jsou velmi drahé, a proto je vhodnější provést několik testů na menších vzorcích v laboratoři. Velikost vzorku je důležitým faktorem. Vzorek by měl mít obdobnou tloušťku a tvar, jako má finální produkt v provozních podmínkách. Typ trysky a tlak vody jsou hlavní parametry použité pro dosažení požadované struktury materiálu. Typ trysky a její tlak jsou voleny s přihlédnutím k proměřené databázi intenzit chlazení trysek. Experimentální zařízení je schopné chladit v široké škále režimů. Chladicí režim je postupně upravován, dokud není dosažena optimální struktura materiálu.

2.1 Experimentální zařízení a experimentální postup

Experimentální zařízení bylo postaveno za účelem nalezení optimální strategie chlazení pro danou ocel (obr. 3). Tvoří ho elektrická pec, tryska, pojezdový vozík se zkušební vzorkem a deflektor.

Testovaný vzorek o rozměrech 50 x 50 x 62 mm byl vyroben z oceli 20MnV6. Vzorek byl osazen čtyřmi termočlánky umístěnými 3, 12, 21 a 50 mm pod chlazeným povrchem. Testovaný vzorek byl zahřát v elektrické peci na počáteční teplotu 900 °C. V průběhu ohřevu byla v peci inertní atmosféra zabraňující oxidaci. Po ohřevu vzorku na požadovanou teplotu byl vzorek přesunut do chladicí polohy pod tryskou. Pneumaticky řízený deflektor byl otevřen a započalo chlazení horkého vzorku (obr. 4). Teploty v daných polohách byly měřeny termočlánky a zaznamenávány během experimentu. Změřené teploty jsou vykresleny v obr. 5.



Obr. 3 Experimentální zařízení

Fig. 3 Experimental apparatus



Obr. 4 Fotografie testovacího vzorku po vyjmutí z pece (vlevo) a v průběhu chlazení tryskou (vpravo)

Fig. 4 Photo of the test sample after its removal from the furnace (left) and during cooling by the nozzle (right)