

Recenzované vědecké články

Energeticky úsporné systémy pro chlazení horkých povrchů, tepelné zpracování a hydraulické odstranění okují

Energy-efficient Systems for Cooling Hot Surfaces, Heat Treatment and Hydraulic Removal of Scale

doc. Ing. Petr Kotrbáček, Ph.D.; doc. Ing. Michal Pohanka, Ph.D.; Ing. Martin Chabičovský, Ph.D.

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

Stanovení reálných okrajových podmínek chlazení je základním předpokladem pro využití numerických modelů sloužících k optimalizaci a řízení vybraných dějů v oblasti hutnictví. Pro získání těchto okrajových podmínek byl vypracován postup, kdy vstupní informace o chlazení jsou získávány na základě experimentů. Poté je provedeno zpracování experimentálně získaných dat a jsou vytvořeny funkce, které vhodným způsobem popisují okrajové podmínky chlazení. Znalost průběhů teplot během chlazení umožňuje určení součinitele přestupu tepla mezi horkým povrchem a chladicím médiem. Reálné okrajové podmínky umožňují následnou optimalizaci chladicích sekcí a návrh finálních konfigurací. Ke zjištění okrajových podmínek jsou využívána unikátní laboratorní zařízení, která dovolují nastavení takových podmínek chlazení, které jsou blízké podmínkám v provozech. V příspěvku jsou uvedeny příklady optimalizace chlazení pracovních válců, příklady návrhů sekcí pro in-line tepelné zpracování kovů a postup při navrhování vysokotlakého ostříku okují. Metodika umožňuje matematicky popsat vliv vodních paprsků trysek na součinitel přestupu tepla nebo na odstraňování vysokoteplotních okují a jí možné použít pro k optimalizaci chlazení a hydraulického odstranění okují pro průmyslové partnery.

Klíčová slova: chlazení; okrajové podmínky; tepelné zpracování; válcování; hydraulické odstranění okují

Determination of real boundary cooling conditions is a fundamental requirement for numerical models and simulations to optimize and control selected processes in metallurgy. To obtain these boundary conditions, a special method has been developed. The input temperature history of cooling is obtained from experiments. The measured data are then mathematically evaluated. Realistic boundary conditions, as the heat transfer coefficient between hot surface and the coolant, allow next optimization of the cooling sections and the design of their configurations. To realize the cooling test, unique laboratory equipment was developed. It allows setting of cooling conditions close to the plant conditions. The paper presents examples of optimization of working roll cooling, examples of design of sections for in-line heat treatment and procedure for designing a new high-pressure descaling sections. The methodology makes it possible to identify the effect of nozzle water jets on the heat transfer coefficient or on removal of high-temperature scale and leads to optimization of cooling and descaling for industrial partners.

Key words: cooling; boundary conditions; heat treatment; rolling; hydraulic descaling

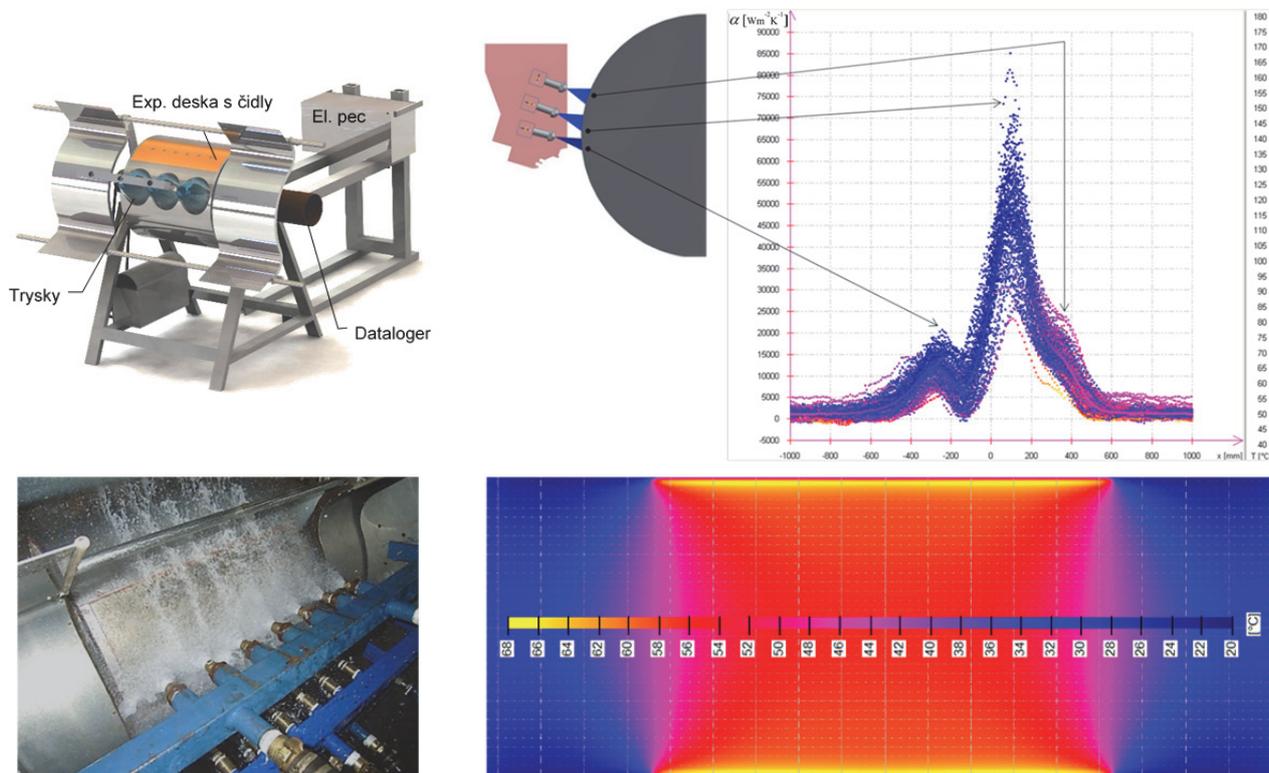
1. Válcovny plechů

Významnou oblastí ocelářského průmyslu, skýtající značný prostor pro optimalizaci chlazení a značné energetické úspory, jsou provozní válcovny tlustých plechů. Dříve byla při návrzích chlazení válců těchto válcoven využívána buď strategie vysokých průtoků, kdy mělo být dosaženo dobrých chladicích účinků zalitím válců vodou, nebo strategie vysokých tlaků, které měly, bez ohledu na energetickou náročnost chladicích systémů, prodloužit životnost válců. Tento postup je však velmi neekonomický, a často kontraproduktivní. Silná vrstva vody brání dynamickému působení vodních paprsků z trysek, a tím

i intenzivnímu chlazení. Současně je velmi problematická i regulace takového systému. Zdálo se, že v této oblasti nelze již nic zásadního změnit, a to byla i strategie výrobců zařízení i dodavatelů trysek. Moderní výzkumné metody vyvinuté a úspěšně používané v Laboratoři přenosu tepla a proudění však prokázaly, že existuje značný prostor na zlepšení současného stavu. Návrhy nových chladicích systémů válců jsou založeny na optimalizaci procesu. To znamená dosáhnout co nejvhodnější chladicí charakteristiky při minimální energetické náročnosti. Při návrhu nového chlazení se využívá propojení výpočtů teplotního zatížení válců s laboratorním měřením chladicích účinků různých typů a konfigurací vodních

tryskek. Údaje o přenosu tepla jsou nezbytné pro navrhování a řízení chladicích sekcí [1-3]. Laboratorní měření je využito ke zjištění průběhu teplot během chlazení. Tyto teploty slouží jako vstupní parametry pro výpočet realistických hodnot součinitele přestupu tepla, který odpovídá intenzitě chlazení. Celý postup umožňuje optimalizaci i velmi složitých chladicích sekcí. Nasazení

optimalizovaných chladicích systémů pak přináší značné úspory z pohledu prodloužení životnosti válců, zvýšení kvality a užitných vlastností prováleků a snížení spotřeby chladicí vody o 25 – 60 %, což představuje jak úspory energie, tak i úspory v počtu tryskek a času nutného na údržbu chladicích systémů.



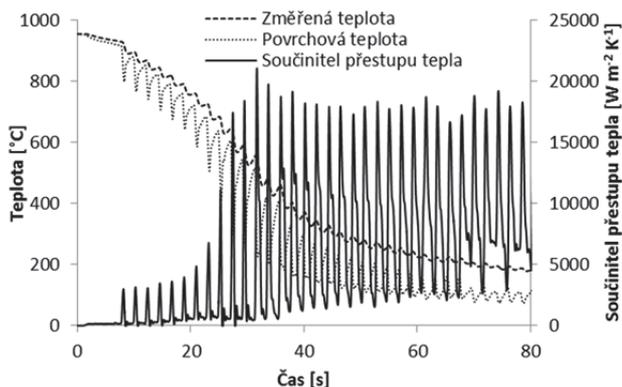
Obr. 1 Experimentální válec pro určení součinitele přestupu tepla (α). Vyhodnocení výsledků měření pro konkrétní chlazení válce - závislost součinitele přestupu tepla (α) na poloze. Výpočet teplotního pole ve válci na základě experimentálně zjištěných okrajových podmínek (α)

Fig. 1 Experimental stand for determination of heat transfer coefficient on roll (HTC). Evaluation of roll cooling experiment - dependence of heat transfer coefficient (HTC) on position of sensor. Calculation of the temperature field inside the work roll based on the experimentally obtained boundary conditions (HTC)

2. In-line tepelné zpracování

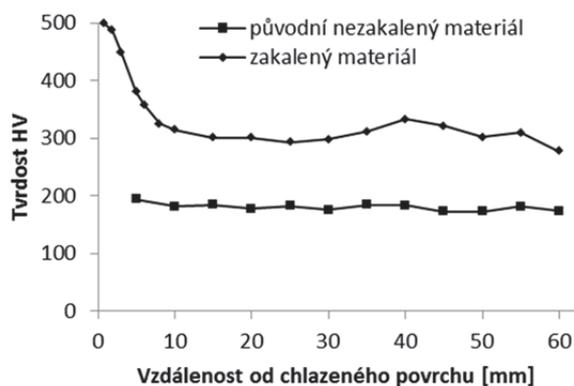
Další oblastí zpracování kovů umožňující dosažení významných energetických úspor je řízené tepelné zpracování. Důraz je kladen na dosažení definované mikrostruktury výrobků, a tím dosažení lepších mechanických vlastností bez nutnosti úpravy chemického složení, tedy bez nutnosti použití drahých legujících prvků. Podstatnou výhodou in-line tepelného zpracování je úspora re-ohřevu materiálu, kdy je materiál tepelně zpracováván bezprostředně po vyválcování. Speciální experimentální zařízení postavené v Laboratoři přenosu tepla a proudění, VUT v Brně, umožňuje nastavování různých režimů chlazení a následně vyhodnocování vlivu těchto režimů na finální strukturu chlazených vzorků. Geometrie chlazení, průběhy teplot a výsledná struktura jsou v jednotlivých krocích optimalizovány [4, 5]. Tento postup se dá s výhodou využít pro výzkum a návrhy tepelného zpracování drátů, profilů, kolejnic a trubek. Tepelně zpracované trubky se například používají

v petrochemickém průmyslu, kde je kladen důraz na vysokou pevnost. U tepelně zpracovaných kolejnic je nutné dodržet přísné normy na homogenitu vnitřní struktury materiálu bez fázových a výrazných pevnostních změn. Pro získání požadovaných mechanických vlastností finálního produktu je vždy nezbytné nalézt vhodný chladicí režim. Tento režim se liší v závislosti na typu materiálu a podmínkách výroby. Intenzita chlazení je funkcí několika parametrů, jako je typ trysky, průtok a tlak vody, teplota vody, teplota povrchu chlazeného materiálu, kvalita povrchu a rychlost pohybu chlazeného materiálu. Dosud není k dispozici žádná funkce pro predikci chladicí intenzity, která zahrnuje všechny uvedené parametry [6]. Experimentální měření je tedy jediným způsobem, jak přesně stanovit intenzitu sprchového chlazení a nalézt vhodný chladicí režim. Změřená teplota je použita jako vstup pro inverzní úlohu vedení tepla, jejímž výstupem je časově závislá povrchová teplota a součinitel přestupu tepla obr. 2 [7]. Příklad vlivu optimalizovaného in-line tepelného zpracování na zvýšení tvrdosti materiálu trubek je na obr. 3 [8].



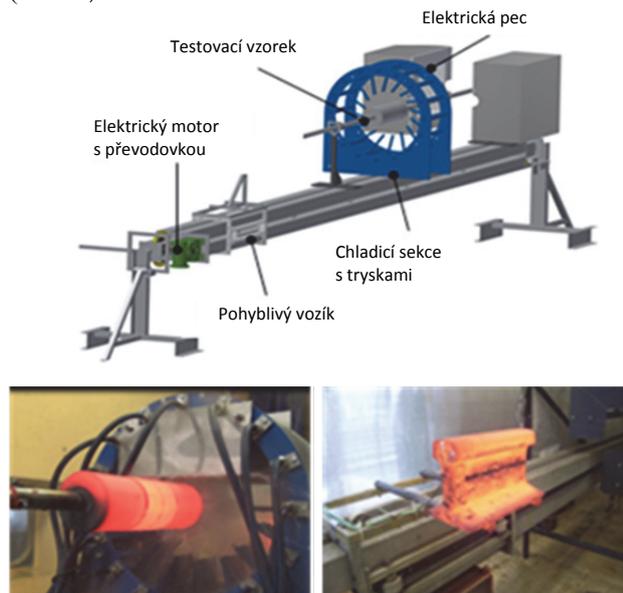
Obr. 2 Experimentálně změřená teplota, in-line vypočtená povrchová teplota a součinitel přestupu tepla

Fig. 2 Experimentally measured temperature, calculated temperature and heat transfer coefficient



Obr. 3 Zvýšení tvrdosti trubky před a po tepelném zpracování
Fig. 3 Increase of the tube hardness after heat treatment

Schéma laboratorního zařízení navrženo pro výzkum chladicích sekcí a in-line tepelné zpracování vzorků (obr. 4.)



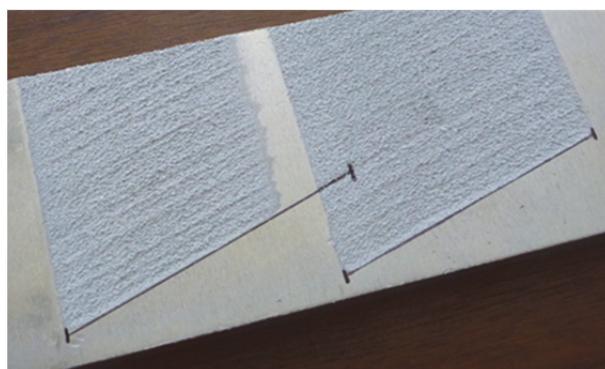
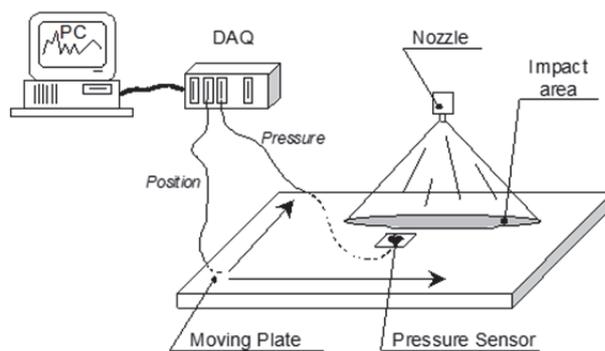
Obr. 4 Laboratorní zařízení pro návrhy a optimalizaci chladicích sekcí, trubek, kolejnic aj.

Fig. 4 Scheme of the laboratory stand for designing and optimization of cooling sections for rolled products (tubes, rails, etc.)

V Laboratoři přenosu tepla a proudění, VUT v Brně, byla vyvinuta metodika pro návrh in-line tepelného zpracování ocelových profilů, kolejnic, trubek a pod [9, 10]. Využívá kombinaci numerického modelování, laboratorního měření, a v poslední fázi také poloprovozních a provozních testů. Tato metodika minimalizuje množství drahých provozních experimentů a eliminuje možné konstrukční chyby.

3. Hydraulické odstranění okují

Experimentální studium hydraulického odstranění okují bylo motivováno jednak požadavky průmyslu na nalezení optimálních parametrů ostříku a dále pak snahou o teoretický popis a porozumění mechanismu odkujení [11]. Při návrzích sekcí pro ostřík okují je nutné volit typ trysek, jejich rozteče, vzdálenosti od povrchu, úhly natočení a tlaky vody. Provozní experimenty jsou drahé a mohou navíc vést ke značným finančním ztrátám. Proto je nutné optimalizovat uvedené parametry na základě laboratorních měření. Ke studiu účinků vysokotlakých ostříků jsou využívány tři přístupy. V prvním kroku jsou proměřeny impaktní tlaky paprsků trysek ve vysokém rozlišení. Experimentální zařízení vlastní konstrukce využívá senzor s průměrem 0,2 mm zabudovaným do ostříkované plochy. Vizualizace mechanických účinků paprsků trysek může být následně doplněna také tzv. erozivním testem. Vypovídající schopnost tohoto testu ovšem nemůže nahradit proměření impaktních tlaků (obr. 5).



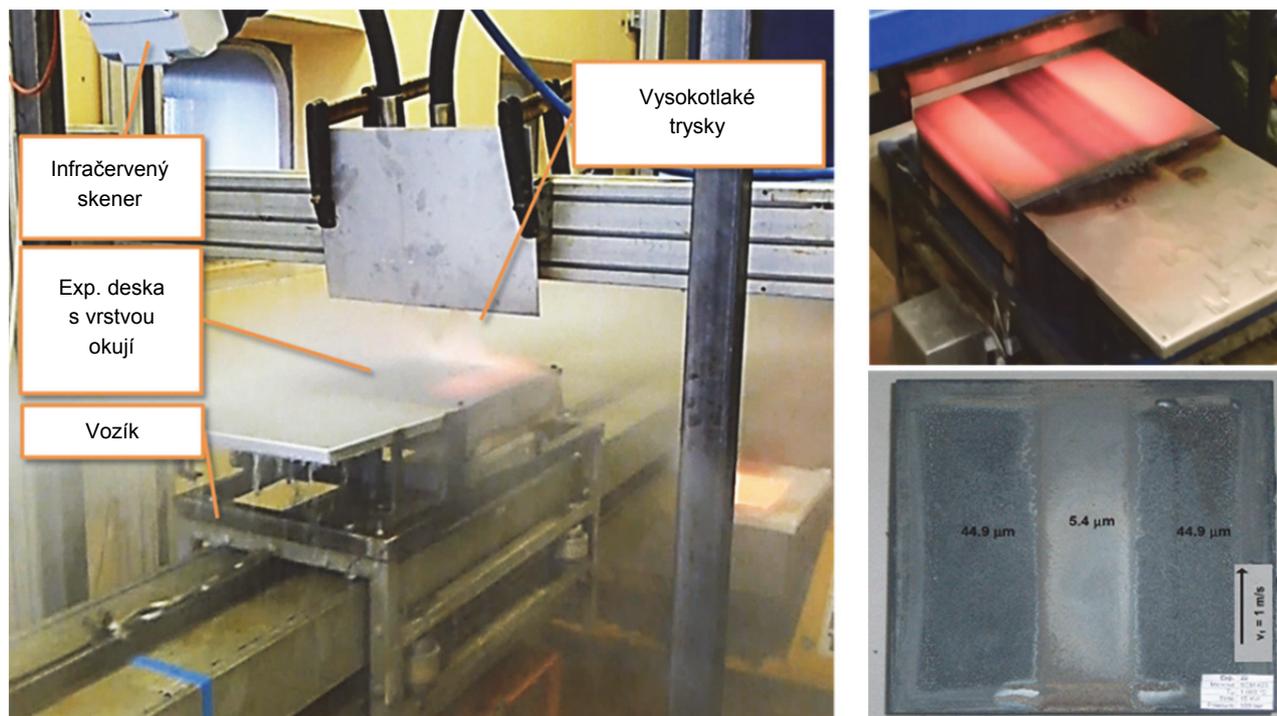
Obr. 5 Schéma měření impaktních tlaků. Erozivní test vysokotlakých trysek

Fig. 5 Scheme of impact pressure measurement device. Erosion test of high pressure nozzles

Dalšími testy, využívanými při studiu vysokotlakých ostříků, jsou testy za pohybu vzorků. Jsou to zkoušky kvality ostříků, kdy jsou vyhodnocovány povrchy experimentálních vzorků a jsou určovány podíly odstraněných okují pro různé parametry ostříků a pro různé režimy vysokoteplotní oxidace vzorků (obr. 5).

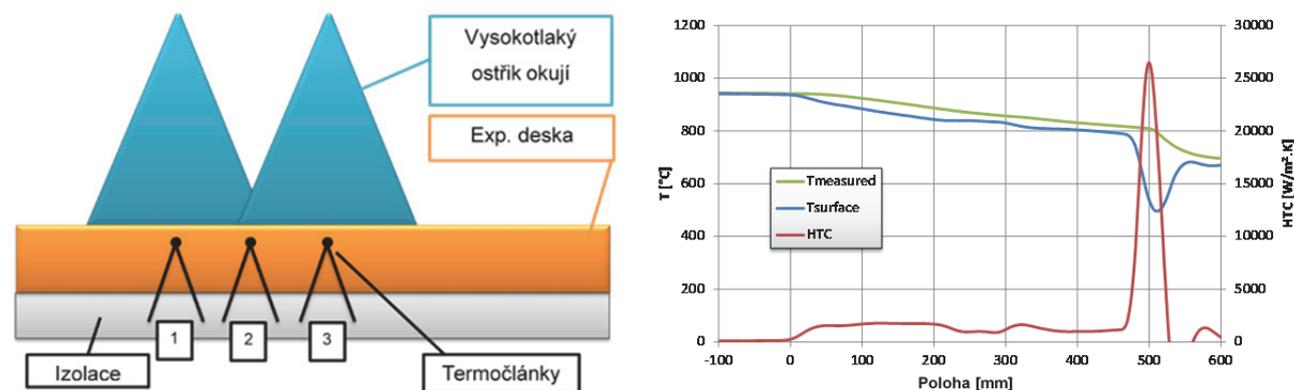
Další laboratorní měření umožňuje zkoumat teplotní ovlivnění ostříkovaného povrchu. Vzorek je osazen čidly a po nahátí vzorku projíždí pod vysokotlakými tryskami.

Je zaznamenávána poloha vzorku a průběhy teplot těsně pod povrchem vzorku. Změřené teploty slouží jako vstupní parametry pro inverzní úlohu a pomocí ní je vypočítán součinitel přestupu tepla (HTC). Pomocí prováděných teplotních experimentů je možné získat informace o intenzitě přenosu tepla. Pomocí simulací je poté možné zjistit vliv změny nastavení ostříku okují na teplotní režim provalků. V případě problémů s dodržением teplot provalku je možné provést optimalizaci nastavení (obr. 6).



Obr. 6 Testy zaměřené na kvalitu odstranění vysokoteplotních okují. Experimentální deska po průjezdu pod tryskami s viditelným podchlazením v oblasti překryvu trysek. Deska s různými tloušťkami okují po vysokoteplotním experimentu.

Fig. 6 Test devices focused on surface quality after removal of high temperature scales. Experimental plate after passage under the descaling nozzles with overlapping area. A plate with different thicknesses of scale after a high-temperature experiment.



Obr. 7 Měření teplot při vysokotlakém ostříku okují. Závislost povrchové a měřené teploty a součinitele přestupu tepla na poloze. Poloha termočlánku č. 2 odpovídá oblasti překryvání trysek a poloha 500 mm odpovídá poloze trysek ve směru pohybu vzorku.

Fig. 7 Diagram of temperature measurement in case of high pressure descaling. Dependence of measured and surface (calculated) temperature and heat transfer coefficient on the position. The position of thermocouple No. 2 corresponds to the nozzles overlapping area, and the position of 500 mm corresponds to the position of the nozzles in the direction of movement of the sample.

Měření poskytuje informaci o vlivu parametrů ostříku na výslednou kvalitu odstranění okují. Je možné optimalizovat výběr trysek, nastavení tlaku ostříku, vzdálenosti a rozteče trysek, úhel sklonu trysek a způsob překrývání vodních paprsků. Dříve byla považována oblast překrytí vodních paprsků (tzv. overlapping area) za hlavní zdroj problémů s kvalitou odkujení. Laboratorní výzkum však prokázal, že velmi problematickou oblastí z pohledu ztráty impaktního tlaku a možných problémů s kvalitou odstranění okují, je oblast za překryvem trysek tzv. washout (obr. 7) [12].

4. Závěr

Metodika navržená v Laboratoři přenosu tepla a proudění byla využita pro zjištění součinitelů přestupů tepla na površích v aplikacích tepelného zpracování, chlazení pracovních válců teplých válcoven a vysokotlakého ostříku okují. Zásadní význam na kvalitu výsledků má způsob měření teplot ve sledovaném tělese. Zde musí mít požadované vlastnosti celý měřicí řetězec. Pro úspěšné zvládnutí celé aplikace jsou využívány poznatky z problematiky přenosu a měření mnohakanálových nízkoúrovňových signálů, konstrukce a zabudování teplotních čidel. Naměřená data jsou dále zpracována s využitím několika specializovaných programů. V případě hledání okrajových podmínek přenosu tepla je nezbytné provedení přesného výpočtu inverzní úlohy. Výsledky získané v Laboratoři přenosu tepla a proudění jsou pravidelně publikovány a srovnávány s výsledky českých a světových pracovišť zabývajících se danou problematikou [13-19].

Metodika přesného určení součinitele přestupu tepla byla využita pro optimalizaci chladících a odkujovacích sekcí pro průmyslové partnery. Příkladem úspěšných spoluprací je návrh tepelného zpracování trubek pro Třinecké železářny a.s., návrh tepelného zpracování H-profilu pro Primetals Technologies Italy S.r.l. Z oblasti válcoven tlustých plechů je to optimalizace a rekonstrukce chlazení válců pro firmy voestalpine AG, Linz a U. S. Steel Košice a HYUNDAI STEEL Korea.

Poděkování

Příspěvek vznikl za podpory projektu CZ.01.1.02/0.0/0.0/15_019/0004924 a za podpory projektu FSI-S-20-6478.

LITERATURA

- [1] KOTRBACEK, P., POHANKA, M., ZACHAR, M. and SCHÖR-KUBER, K. W. Optimization of Work Roll Cooling in Rolling. *METEC & 4th ESTAD 2019 European Steel Technology and Application Days*, 24.-28. June 2019, CCD Congress Center Düsseldorf, Düsseldorf, Germany.
- [2] KOTRBÁČEK, P., RAUDENSKÝ, M., HORSKÝ, J. and POHANKA, M. Experimental Study of Heat Transfer in Hot Rolling. *Revue de Métallurgie - Cahiers d'Informations Techniques*, 7-8 (2006) 103, 333-341. ISSN 0035-1563.
- [3] KOMÍNEK, J., KOTRBÁČEK, P. and HORSKÝ, J. Design of Cooling Systems for Grooved Rolls. In *METAL 2016, Conference*

- Proceedings*, 25th International Conference on Metallurgy and Materials, Ostrava: Tanger Ltd., 2016, pp. 255-260. ISBN 978-80-87294-67-3.
- [4] HORSKÝ, J., RAUDENSKÝ, M. and KOTRBÁČEK, P. Experimental Study of Long Product Cooling in Hot Rolling. *Journal of Materials Processing Technology*, 80-81 (1998) 337-340. Available at <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0924013698001915>. 80-81.
- [5] KOTRBACEK, P. and POHANKA, M., CHABICOVSKY M., RAUDENSKY, M. Study of Heat Transfer Distribution during Plate Heat Treatment, In *METEC & 4th ESTAD 2019 European Steel Technology and Application Days*, 24.-28. June 2019, CCD Congress Center Düsseldorf, Düsseldorf, Germany.
- [6] CHABIČOVSKÝ, M. and HORSKÝ, J. Factors Influencing Spray Cooling of Hot Steel Surfaces. In *METAL 2016, Conference Proceedings*, 25th International Conference on Metallurgy and Materials. Brno, 2016, pp. 77-83. ISBN 978-80-87294-79-6.
- [7] HORSKÝ, J. and KOTRBÁČEK, P. In-line Heat Treatment of Long Products. In *METAL 2014, Conference Proceedings*. 23rd International Conference on Metallurgy and Materials. Ostrava: Tanger Ltd., 2014, pp. 253-258. ISBN 978-80-87294-54-3.
- [8] RAUDENSKÝ, M., CHABIČOVSKÝ, M. and TUROŇ, R. Development and Plant Verification of Tube Quenching Unit. In *7th International Congress on Science and Technology of Steelmaking*, Milano: Associazione Italiana di metallurgia, 2018, pp. 1-8. ISBN 978-88-98990-14-6.
- [9] HNÍZDIL, M. and KOTRBÁČEK, P. Heat Treatment of Rails. *Materiali in tehnologije*, 51 (2017) 2, 329-332. ISSN 1580-2949.
- [10] CHABIČOVSKÝ, M., HORSKÝ, J., RAUDENSKÝ, M., HNÍZDIL, M. and KOTRBÁČEK, P. Design of Quenching Units for Heat Treatment of Tubes. In *European Conf. on Heat Treatment 2015 and 22nd IFHTSE Congres*. Milano: Associazione Italiana di metallurgia, 2015, pp. 1-9. ISBN 978-88-98990-03-0.
- [11] RAUDENSKÝ, M., HORSKÝ, J., HORÁK, A., POHANKA, J. and KOTRBÁČEK, P. Hydraulic Descaling Improvement, Findings of Jet Structure on Water Hammer Effect. *Revue de Métallurgie*, 2 (2007) 104, 84-90. ISSN 1156-3141.
- [12] POHANKA, M.; HNÍZDIL, M.; KOTRBÁČEK, P. and VOTAVOVÁ, H. *Hydraulic descaling of wire coils during pickling program*. 2018, p. 45-48.
- [13] WENDELSTORF, J., SPITZER, K.-H. and WENDELSTORF, R. Spray water cooling heat transfer at high temperatures and liquid mass fluxes, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 51 (2008) 19-20, 4902-4910.
- [14] KRZYŻANOWSKI, M. and BEYNON, J.-H. Modelling the Boundary Conditions for Thermo Mechanical Processing, Oxide Scale Behaviour and Composition Effects, *Modelling Simulation Material Science Engineering*, (2000), p. 8.
- [15] CEBO-RUDNICKA, A. and MALINOWSKI, Z. Identification of heat flux and heat transfer coefficient during water spray cooling of horizontal copper plate, (2019) *International Journal of Thermal Sciences*, Volume 145, November 2019, Article number 106038.
- [16] BERNARDIN, J.D. and MUDAWAR, I. The leidenfrost point: Experimental study and assessment of existing models, *Journal of Heat Transfer*, 121 (1999) 4, 894-903.
- [17] SMETANA, B., ŽALUDOVÁ, M., ZLÁ, S., DOBROVSKÁ, J., TKADLEČKOVÁ, M., KLUS, P. and ROSYPALOVÁ, S. Possibilities of heat capacity measurement of metallic systems. In *METAL 2012, Conference Proceedings*, 21st International Conference on Metallurgy and Materials, Ostrava: Tanger Ltd., pp. 652-658. ISBN 978-80-87294-31-4.
- [18] YAO, S.C. and COX, T.L., A general heat transfer correlation for impacting water sprays on high-temperature surfaces, *Experimental Heat Transfer*, 15 (2002) 4, 207-219.
- [19] RIVALLIN, J. and VIANNAY, S., General principles of controlled water cooling for metallurgical on-line hot rolling processes: Forced flow and sprayed surfaces with film boiling regime and rewetting phenomena, *International Journal of Thermal Sciences*, 40 (2001) 3, 263-272.