

INFLUENCE OF COOLANT TYPE ON COOLING SPRAY INTENSITY

A. Horák*, H. Bellerová*

Summary: *Spray cooling is an integral part of many manufacturing processes. This paper describes the cooling qualities of some coolants different from water. Emulsions, mineral lubricants and salt mixtures can be more beneficial for some industrial applications. On the other hand, there are some applications where even a small amount of salt or oil contaminations can cause serious problems. The research work was focused on finding the relevant relations of cooling regimes and different coolants depending on temperature drops, and then comparing the cooling properties to each other and water as well. A new testing bench and numerical algorithms were developed based on inverse tasks solved within this research.*

1. Úvod

Při mnoha metalurgických procesech prochází kontinuálně odlévaný materiál, resp. provalek soustavou kolektorů a trysek, pomocí které je udržováno homogenní teplotní pole s ohledem na výslednou strukturu produktu. Vysoké nároky na kvalitu a mechanické vlastnosti nových materiálů vyžadují použití matematických algoritmů simulujících vedení tepla během chlazení. V dnešní době není výjimkou využití experimentu v kombinaci s řešením inverzní úlohy pro stanovení intenzity chlazení, tj. okrajové podmínky úlohy vedení tepla. Tyto techniky jsou využívány zejména pro vodu jako hlavní chladicí medium. Literatura téměř pomíjí ostatní chladicí tekutiny, jako jsou oleje, roztoky solí a jiných substancí. Tato studie, jež byla součástí evropského projektu EWRCOOL, měla za úkol stanovit intenzitu sprchového chlazení pro ne zcela běžná chladiva a porovnat ji s vodním chlazením.

2. Experimentální stand

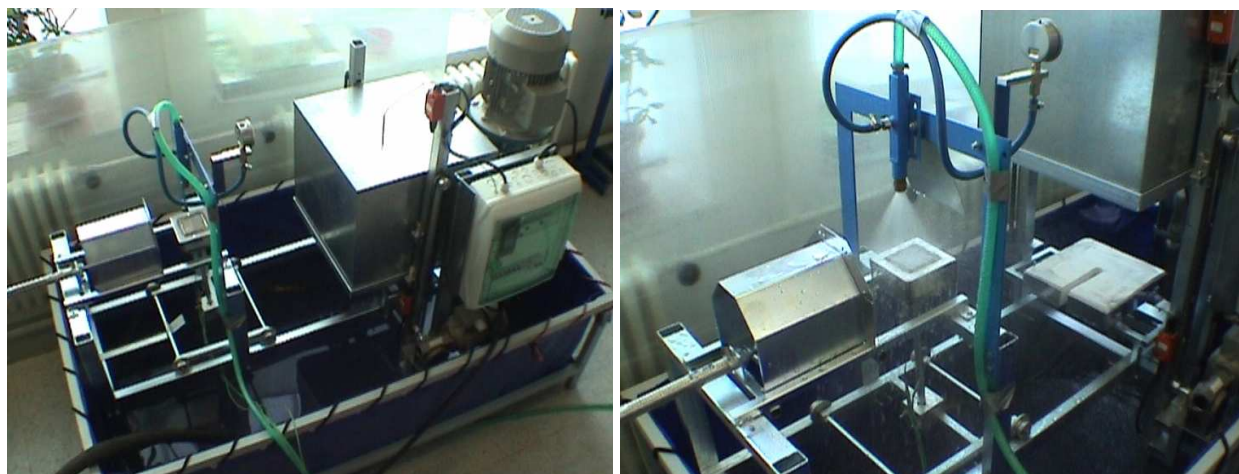
V rámci řešení grantu Fondu vědy a výzkumu FSI 2005 bylo v LPTaP vyvinuto experimentální zařízení pro výzkum počítačem řízeného chlazení kovových vzorků. Zařízení (**Obr. 1**) bylo navrženo tak, aby umožňovalo co nejširší škálu prováděných experimentů.

Jednou ze základních součástí je ohřívací sekce skládající se z elektrické muflové pece určené pro zahřátí zkoumaného vzorku na počáteční teploty. Rozsah pracovních teplot je

* Ing. Aleš Horák, Ing. Hana Bellerová, Laboratoř přenosu tepla a proudění, Fakulta strojního inženýrství, VUT Brno, Technická 2896/2, 616 69, Brno, tel.: + 541 143286, e-mail: bellerova@lptap.fme.vutbr.cz

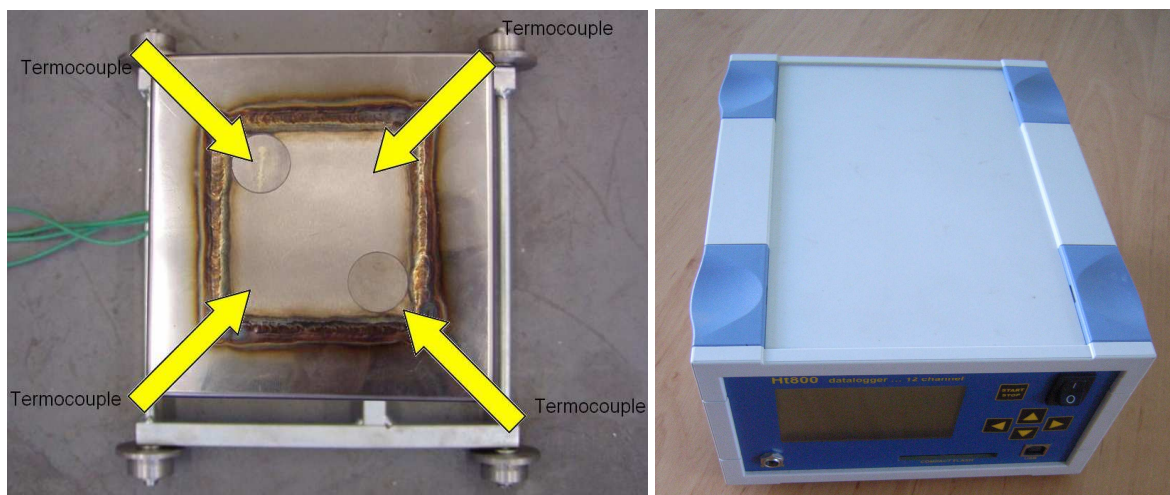
v rozmezí od 0°C až 1200°C. Muflová pec je umístěna na tepelně odstíněném polohovatelném rámu. Pohyb rámu pece je vertikální, tak aby umožňoval umístění a vyjmutí zkoumaného vzorku z pece. Pohyb pece je zajišťován elektromotorem přes mechanickou převodovou skříň a manuálně řízen kontrolní jednotkou ovládání. V peci je umístěn jeden termočlánek typu K, který je napojen na číslicový regulátor ovládání pece. Tento regulátor je plně programovatelný a umožňuje aplikovat celou řadu ohřívacích režimů. Zařízení umožňuje experimenty i se vzorky v ochranné inertní atmosféře (technický dusík či argon). Druhou základní součástí je chladicí sekce, která se nachází na opačné straně laboratorního zařízení a je navržena tak, aby umožňovala experimenty s malými vzorky do objemu 1000 cm³.

Chladicí sekce se skládá z nosného rámu, trysky (vodní nebo vodo-vzdušná) a pohyblivého deflektoru. Deflektor chladicí sekce (**Obr. 1** vlevo) má dvě krajní polohy – otevřeno (propouští vodní proud) a zavřeno (voda je odrážena mimo chlazený vzorek). Pohyb deflektoru je zajišťován tlakovým vzduchem přes přepínač a pneumatický píst. Takto lze realizovat libovolný průběh chlazení. Součástí zařízení je i vícestupňové čerpadlo, které s spolu s nádrží na chladicí kapalinu tvoří uzavřený chladicí okruh. Během samotného měření je neustále kontrolován a snímán tlak a průtok vody (eventuelně i vzduchu) proudícího v chladicím okruhu. Po připojení odnímatelného topného tělesa zařízení umožňuje i experimenty s předeřátou chladicí látkou.



Obr. 1 vlevo – pohled na celý stand při pokusu; vpravo – chlazení vzorku kuželovou tryskou

Třetí důležitou část tvoří testovaný vzorek, který je znázorněn na **Obr. 2** vlevo. Vzorek je vyroben z plátu austenitické oceli o 80x80x25 mm (výška x šířka x tloušťka). Během experimentů je vzorek vybaven sadou senzorů měřících teplotu. V tomto konkrétním případě se jedná o 4 různé senzory běžně používané na jiných aplikacích v Laboratoři přenosu tepla a proudění. Pokusy s těmito senzory budou využity k jejich vzájemnému porovnání a vytvoření matematického aparátu pro vzájemný přepočet. Základem každého senzoru je vždy jeden termočlánek typu K (0,5 – 1,5 mm). Rozdílná je však geometrie senzoru a umístění termočláneku. Termočláneky jsou umístěny buď v jednotlivých isothermách nebo kolmo na ně, a to v různých hloubkách. Tyto rozdíly pak způsobují různou rychlost odezvy na chlazení, různou přesnost a zašumění signálu. Zkoumaný vzorek je dále připevněn na pohyblivém vozíku (**Obr. 1**), na kterém je převážen během pokusů z ohřívací do chladicí sekce a zpět.



Obr. 2 vlevo vzorek umístěný na vozíku (znázorněna poloha všech 4 druh senzorů); vpravo data logger Ht800

Změřená data jsou během experimentu zaznamenávána a uchovávána v data loggeru HT800 (**Obr. 2** vpravo). Data logger s kapacitou interní paměti 8 MB umožňuje snímat až 16 kanálů různými frekvencemi až do 450 Hz. Při měření se využívá pouze 5 kanálů (4 senzory uvnitř vzorku a termočlánek snímající teplotu chladicí kapaliny) a frekvence 300 Hz. Typická délka experimentu je 2 až 4 minuty v závislosti na počáteční teplotě a intenzitě chlazení, což představuje přibližně 180000–360000 vzorků. Po skončení experimentu jsou data přenesena do počítače, kde jsou přepočítána pomocí inverzní úlohy a dále vyhodnocována.

Postup během měření je následující: testovaný vzorek je nejprve zavezen do ohřívací komory a nahřán na požadovanou počáteční teplotu. Startovací teplota obvykle bývá v rozmezí 200–300°C. Data logger se uvede do měřicího módu. Vzorek je poté přesunut do chladicí sekce. Následuje zapnutí čerpadla a nastavení požadovaného tlaku a průtoku dle experimentálního plánu. Deflektor musí být v zavřené poloze, tak aby nejprve odrážel chladicí kapalinu. Následuje otevření deflektoru a ostřík vzorku dle zvoleného ostřikového plánu. Po skončení experimentu se data přenesou do počítače a vyhodnotí.

2. Experimentální program

Experimentální program (viz. **Tab. 1**) byl rozdělen do tří základních částí podle druhu chladicí kapaliny: čistá voda (experimenty PW1-PW10), voda s příměsí lubrikantu RM 192 (RM01-50), jehož dynamická viskozita je 400 ± 200 mPa.s, a voda s rozpuštěnými solemi $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O} + \text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$. Pro chlazení byla zvolena kuželová tryska s úhlem rozstříku 60° a průtokem 18,03 l/min při tlaku 5 barů (pro čistou vodu) umístěná kolmo nad povrchem vzorku ve výšce 150 mm. Počáteční teplota byla nastavena na 250°C. Během experimentů s čistou vodou byl tlak postupně zvyšován z 1 baru až na 10 barů. Druhá a třetí část experimentálního programu využívala stálý tlak 5 barů, měnila se však koncentrace směsi. Po každém experimentu byly odebrány vzorky chladících kapalin na následnou chemickou analýzu.

Tab. 1 Seznam experimentů, 2x opakováno

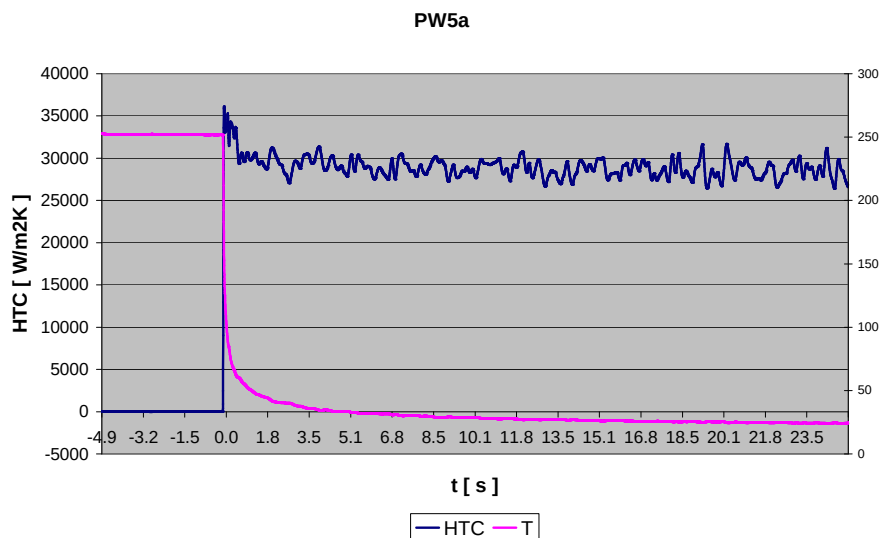
Čistá voda, 460.844 (60°)					
Název souboru	Výška [mm]	Úhel dopadu	Tlak vody [bar]	Celkový průtok [l/s]	Poznámka
PW1	150	90°	1.0	9.47	1x opakováno
PW3	150	90°	3.0	14.70	1x opakováno
PW5	150	90°	5.0	18.03	3x – referenční
PW7	150	90°	7.0	20.63	1x opakováno
PW10	150	90°	10.0	23.80	1x opakováno
Lubrikant RM 192, 460.844 (60°), 100 l vody v chladicím okruhu					
Název souboru	Výška [mm]	Úhel dopadu	Tlak chladiva [bar]	Celkový průtok [l/s]	Poznámka
RM01	150	90°	5.0	18.03*	0.1% (0.1kg)
RM1	150	90°	5.0	18.03*	1% (1,01kg)
RM5	150	90°	5.0	18.03*	5% (5,26kg)
RM10	150	90°	5.0	18.03*	10% (11,11kg)
RM20	150	90°	5.0	18.03*	20% (25kg)
RM50	150	90°	5.0	18.03*	50% (100kg)
CaCl*2H₂O + MgSO₄*7H₂O, 460.844 (60°), 100 l vody v chladicím okruhu					
Název souboru	Výška [mm]	Úhel dopadu	Tlak chladiva [bar]	Celkový průtok [l/s]	Poznámka
TH1655	150	90°	5.0	18.03*	Tvrdost vody 16.55 (188.5g + 507.5g)
TH3010	150	90°	5.0	18.03*	Tvrdost vody 30.10 (367g + 1015g)

*tabulkový průtok pro čistou vodu

4. Analýza výsledků

Výstupem každého jednotlivého experimentu je soubor obsahující časovou závislost teploty pro dané parametry experimentu. Každý takový soubor obsahuje záznamy ze čtyř různých senzorů. Pro potřeby této studie byly vyhodnoceny data ze senzoru s nejrychlejší odezvou na chladicí impuls. Takto získaná data byla použita pro algoritmus inverzní úlohy. Typický průběh experimentu je znázorněn na **Obr. 3**, kde růžová křivka představuje pokles teploty (osa vpravo) z počáteční hodnoty v důsledku chlazení (v tomto konkrétním případě se jedná o čistou vodu s tlakem 5 barů). Modrá křivka znázorňuje součinitel přestupu tepla (angl. HTC). Osa y zachycuje čas v s. Začátek chlazení je patrný díky prudkému zlomu obou křivek v čase 0. Jedná se o velice intenzivní chlazení, kdy teplota senzoru klesne během prvních dvou sekund o více než 200°C. K porovnání intenzity chlazení čisté vody slouží **Obr. 4 a 5**. První obrázek porovnává pokles teplot pro experimenty využívající k chlazení pouze vodu. Druhý

graf potom vykresluje průběh HTC, zejména zde je patrný rozdíl pro jednotlivé nastavení tlaků (např. HTC pro 10 barů je cca 2,5x větší než pro tlak 1 bar).

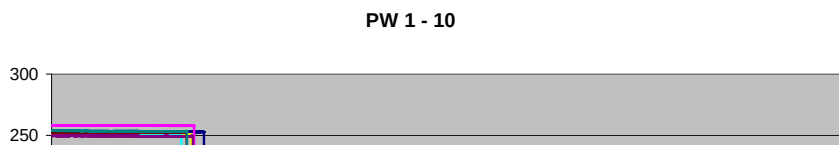


Obr. 3 Průběh teploty a HTC v čase, experiment s čistou vodou, tlak 5 barů

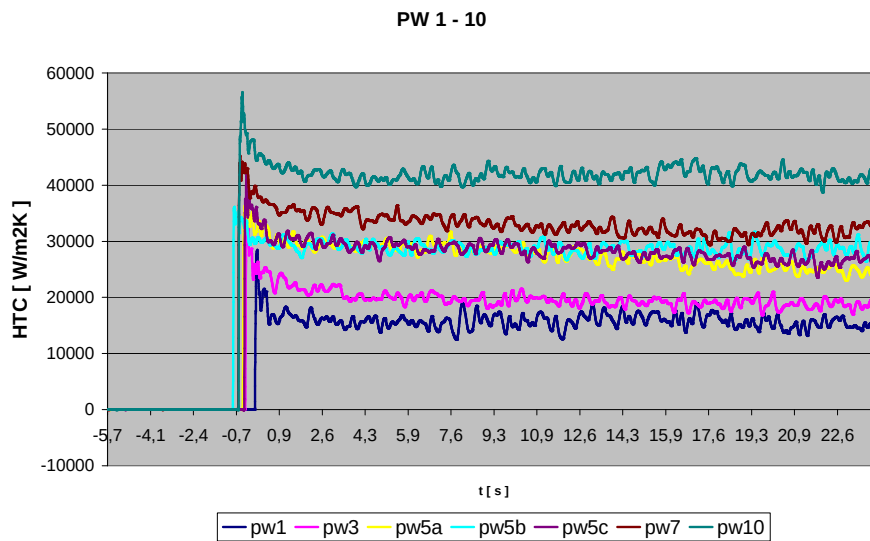
Součinitele přestupu tepla pro vodu s rozpuštěnými solemi $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ + $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ jsou znázorněny na **Obr. 6**. Tato skupina experimentů sloužila pro kvantifikaci vlivu tvrdosti vody na intenzitu chlazení. Z těchto výsledků vyplývá, že zde určitý vliv je (s růstem koncentrace solí a tvrdosti vody klesá intenzita chlazení), ale v porovnání s vlivem tlaku kapaliny je minimální (cca 10%).

Třetí skupina chladiv zkoumající vliv koncentrace příměsí minerálních olejů je popisována na **Obr. 7**. Celá skupina obsahující koncentrace 0,1 – 50 % maziva RM192 byla prováděna za konstantního tlaku 5 barů. Výsledky ukazují negativní vliv zvyšující se koncentrace oleje na účinnost chlazení (rozdíl HTC mezi koncentrací 0,1 a 50 % téměř 30 %). Přesto celá řada průmyslových aplikací takovýchto maziv z technologických důvodů vyžaduje.

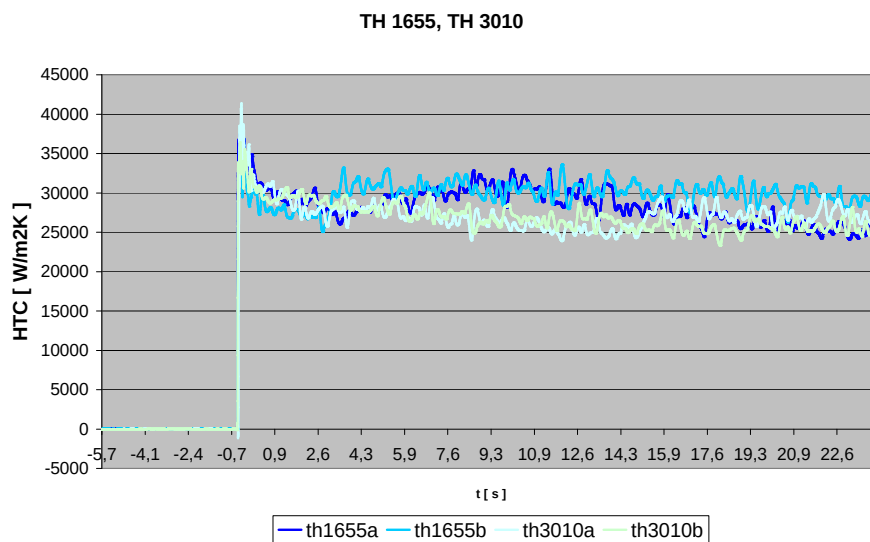
Obr. 8 – 10 porovnávají průměrné hodnoty HTC mezi jednotlivými experimenty a skupinami chladiv – **Obr. 8** v absolutních číslech, **Obr. 9** rozdíl vůči referenční hodnotě vody při tlaku 5 barů a **Obr. 10** v % vůči téže referenční hodnotě.



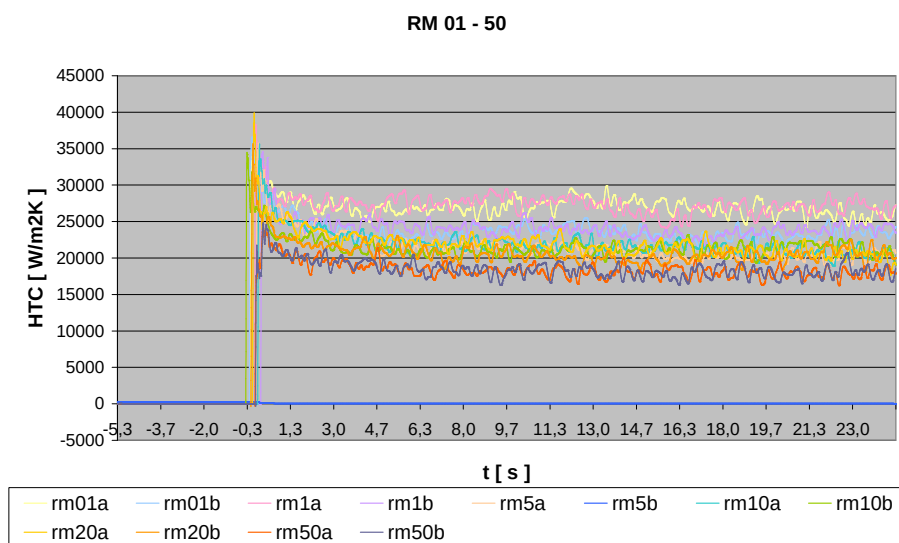
Obr. 4 Porovnání průběhů teplot, čistá voda, tlak 1 – 10 barů



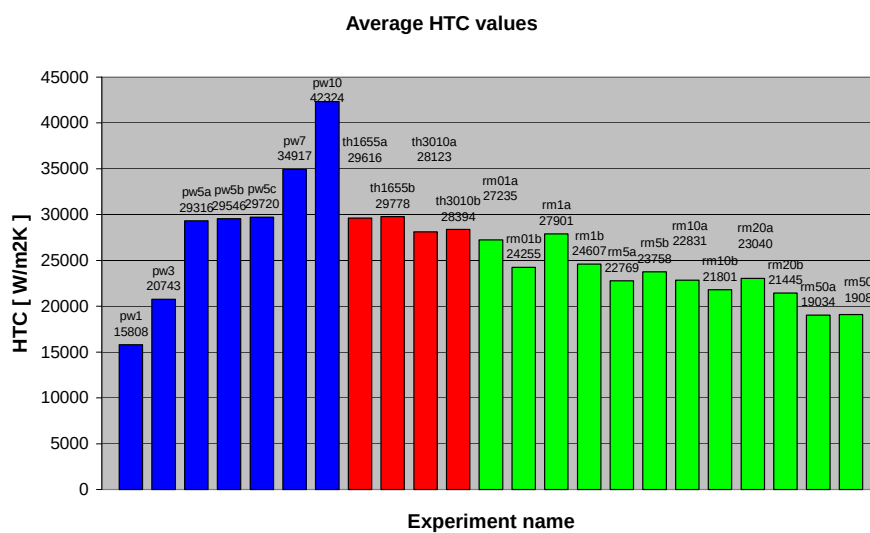
Obr. 5 Porovnání HTC, čistá voda, tlak 1 – 10 barů



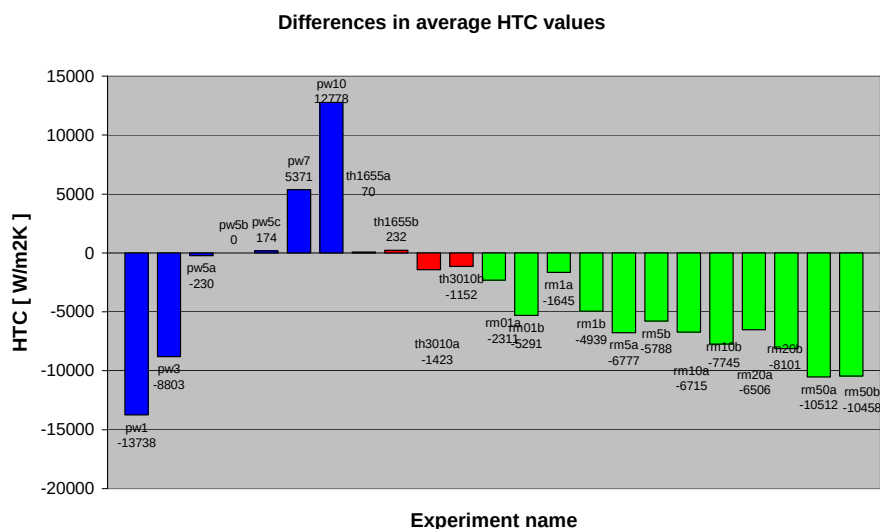
Obr. 6 Porovnání HTC, voda + soli, tvrdost vody 16,55 a 30,10



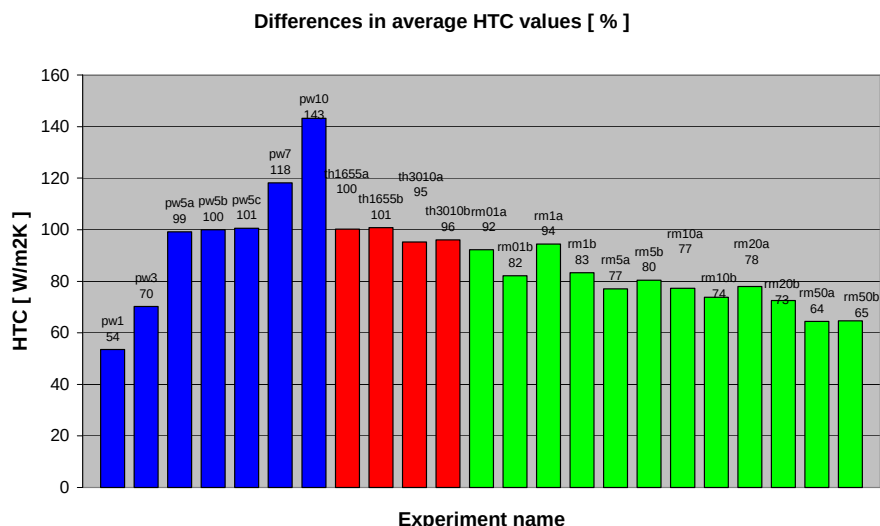
Obr. 7 Porovnání HTC, voda + RM192, koncentrace 0,1 – 50%



Obr. 8 Porovnání průměrných HTC pro vodu (modrá), soli (červená) a RM192 (zelená)



Obr. 9 Rozdíl průměrných HTC pro vodu (modrá), soli (červená) a RM192 (zelená) vůči referenčnímu bodu (voda tlak 5 barů)



Obr. 10 Procentuální porovnání průměrných HTC pro vodu (modrá), soli (červená) a RM192 (zelená) vůči referenčnímu bodu (voda tlak 5 barů)

5. Závěrečné shrnutí

V rámci projektu EWRCOOL bylo v Laboratoři přenosu tepla a proudění provedena kompletní série experimentů zaměřených na zjištění chladicích účinků různých chladiv. K tomuto účelu bylo vyvinuto a postaveno nové experimentální zařízení. Celkem bylo provedeno 25 experimentů s čistou vodou, se směsí vody a anorganických solí a s emulzí založenou na LUBRODALU RM192. Pro vyhodnocování byl vyvinout algoritmus založený na řešení inverzní úlohy vedení tepla.

Experimenty s vodou jako hlavním chladicím médiem prokázaly velký vliv tlaku na intenzitu přestupu tepla (1 bar HTC=15 808, tj. 54% - 10 barů HTC=42 234, tj. 143% vůči referenční hodnotě 29 546 při 5 barech [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$]). Vícenásobným provedením referenčního pokusu byla potvrzena opakovatelnost a stálost experimentálního postupu (zjištěná odchylky $\pm 1\%$). Praktické využití lze najít v plynulé regulaci chlazení pomocí změny tlaku.

Vliv tvrdosti vody na velikost součinitele přestupu tepla je minimální. Maximální pokles byl pro tvrdost 30,10 pouze 5%. Lze předpokládat, že s rostoucí tvrdostí vody bude dále pokles řádově v jednotkách procent.

Výsledky třetí skupiny experimentů vykazují znatelný pokles průměrné hodnoty HTC. Bylo potvrzeno, že při stejném tlaku se s rostoucí koncentrací lubrikantu snižuje efektivita chlazení. Zajímavým zjištěním je fakt, že největší pokles nastal při kontaminaci nízkými koncentracemi. Příměsi 0,1-1% LUBRODALU RM192 způsobilo pokles průměrné hodnoty HTC o 7 – 17%, zatímco například 20% RM192 pouze 22 – 27%. Při maximálním tzn. 50% obsahu došlo k poklesu až na hodnotu $19\,034\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$, což představuje 64% HTC vody při 5 barech.

6. Poděkování

Tato práce vznikla za podpory Fondu VaV FSI 2005 a evropského projektu EWRCOOL.

7. Literatura

- Hall, D.D., Mudawar, I., *Prediction of mechanical properties of komplex-shaped aluminum alloy parts subjected to spray quenching*, ASME, 1994.
- Horák, A., *Vazba inverzní úlohy na návrh experimentu*, pojednání ke státní doktorské zkoušce, VUT v Brně, FSI, září 2006.
- Horák, A., Vavrečka, L., *Vývoj a výroba experimentálního zařízení pro řízené chlazení kovových vzorků*, žádost o udělení grantu VaV FSI, Brno, 2005.
- Horák, A., Vavrečka, L., *Vývoj a výroba experimentálního zařízení pro řízené chlazení kovových vzorků*, poster do grantové soutěže VaV FSI, Brno, 2006.
- Horský, J., Raudenský, M., *Measurement of heat transfer characteristics of secondary cooling in continuous casting*, 14 th International metallurgical & materials conference, Metal 2005 May 24–26, 2005, Hradec n/Moravicí, Czech republic.
- Horský, J., Raudenský, M., Šaler, B., *Secondary cooling in continuous casting*.
- Horský, J., Raudenský, M., Tseng A. A., *Heat transfer study of secondary cooling in continous casting*, AISTech 2005, Iron & Steel technology conference and exposition, May 9-12, 2005, Charlotte, USA.
- Horský, J., Vavrečka, L., Pohanka, M., *Simulation of thermal behavior of rolls in rolling*, 1 st International conference on simulation and modelling of metallurgical processes in steelmaking, 25 - 27 October 2005, Brno, Czech republic.
- Pohanka, M., *Technical experiment based inverse tasks in mechanics*, závěrečná doktorská práce, LPTP FSI VUT v Brně, 2006.
- Raudenský, M., *Inverzní úlohy vedení tepla*, habilitační práce, FSI VUT v Brně, 1992.
- Raudenský, M., Dumek, V., *Inverzní úloha pro stanovení součinitele přestupu tepla*, Strojnický časopis, 43. 1992, č. 1.
- Raudenský, M., Horský, J., Pohanka, M., *Optimal cooling of rolls in hot rolling*, Journal of Material processing technology, 2002.
- Raudenský, M., Horák, A., Pohanka, M., Juriga, A., *Contamination trials*, EWRCOOL projekt, Düsseldorf, February 2006.
- Raudenský, M., Horák, A., Pohanka, M., Juriga, A., Boháček, J., Bellerová, H., *Contamination trials II.*, EWRCOOL projekt, San Sebastian, November 2006.
- Raudenský, M., Horák, A., Pohanka, M., Juriga, A., Boháček, J., Bellerová, H., *Contamination trials summary*, EWRCOOL projekt, January 2007.

