

VĚDECKÉ SPISY VYSOKÉHO UČENÍ TECHNICKÉHO V BRNĚ

Edice Habilitační a inaugurační spisy, sv. 737

ISSN 1213-418X

Milan Hnízdl

EXPERIMENTÁLNÍ VÝZKUM V OBLASTI PŘENOSU TEPLA NA OCELOVÝCH POVRŠÍCH

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta strojního inženýrství

Laboratoř přenosu tepla a proudění

Ing. Milan Hnízdl, Ph.D.

**EXPERIMENTÁLNÍ VÝZKUM
V OBLASTI PŘENOSU TEPLA
NA OCELOVÝCH POVRŠÍCH**

**HEAT TRANSFER ON STEEL SURFACES,
EXPERIMENTAL RESEARCH**

**ZKRÁCENÁ VERZE HABILITAČNÍ PRÁCE
OBOR: APLIKOVANÁ MECHANIKA**



BRNO 2022

KLÍČOVÁ SLOVA

přenos tepla, experimentální metody, tepelné zpracování, součinitel přestupu tepla, válcování, kontinuální odlévání

KEYWORDS

heat transfer, heat treatment, heat transfer coefficient, steel surface, rolling

MÍSTO ULOŽENÍ PRÁCE

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

© Milan Hnízdl, 2022

ISBN 978-80-214-6097-3

ISSN 1213-418X

OBSAH

PŘEDSTAVENÍ AUTORA.....	4
1 ÚVOD	5
2 VÝZKUM V OBLASTI PLYNULÉHO ODLÉVÁNÍ OCELI.....	6
2.1 „Přenositelnost“ experimentálně získaných dat na austenitické desce na běžně odlévané oceli	6
2.2 Vliv teploty vody na intenzitu chlazení během kontinuálního odlévání	8
2.3 Predikce Leidenfrostovy teploty pomocí korelací	9
3 VÝZKUM V OBLASTI VÁLCOVÁNÍ	11
3.1 Optimalizace chlazení pracovních válců a verifikace intenzity chlazení v průmyslových podmínkách	11
3.2 Optimalizace chlazení pracovních válců při válcování za studena	12
4 VÝZKUM V OBLASTI TEPELNÉHO ZPRACOVÁNÍ.....	16
4.1 Proces vývoje chladicího zařízení pro tepelné zpracování	17
4.2 Vývoj Zařízení pro Tepelné zpracování trubek	19
4.3 Vliv oxidických vrstev na velikost součinitele přestupu tepla při tepelném zpracování	21
4.4 Vývoj chladicích systému pro tepelné zpracování horizontálně se pohybujících plechů.....	23
4.5 Studium intenzifikace vodního chlazení pomocí proudění vzduchu.....	26
5 ZÁVĚR	30
LITERATURA	32

PŘEDSTAVENÍ AUTORA



Autor habilitační práce vystudoval v roce 2008 magisterský obor matematické inženýrství na Vysokém Učení technické v Brně, Fakultě strojního inženýrství. Dále pokračoval v doktorském studiu v Laboratoři přenosu tepla a proudění, kde v roce 2012 obhájil disertační práci s názvem Vývoj Metod In-Line Tepelného Zpracování, obor inženýrská mechanika. V laboratoři přenosu tepla a proudění byl do roku 2015 zaměstnán jako technickohospodářský pracovník a od roku 2015 až dosud jako odborný asistent.

Autor se věnuje převážně studiu přenosu tepla na pohybujících se površích. Řeší aplikovaný výzkum pro průmyslové partnery v oblasti chlazení při výrobě ocelových produktů. Zabývá se studiem a návrhem chladicích zařízení. V rámci této činnosti je od roku 2008 autorem či spoluautorem více než 60 technických zpráv pro průmyslové partnery převážně ze zahraničí, např: Fives Stein, Francie; Danieli, Itálie; ArcelorMittal, USA; Posco, Jižní Korea; Primetals, Itálie; Voest Alpin, Rakousko; Třinecké železářny, Česká republika. V těchto studiích se autor zabýval vývojem a charakterizací chladicích systému při kontinuálním odlévání oceli, optimalizaci chlazení pracovních válců či tepelnému zpracování plechů, h-profilů, kolejnic, trub atd.

Autor se zapojil také do řešení 8 národních i nadnárodních grantů, např: EU RFCS RFSR-CT-2015-00006 MANCOOL; EU RFCS RFSR-CT-2014-00010 HIPERSCALE; MPO TRIO FV10253 Research and Development Of Progressive Micro-Alloyed Materials for Temperature Controlled Rolling and Cooling With Subsequent Treatment of Seamless Tubes for Use in Area OCTG and Machinery Industry; TAČR TA02011184 Vysoce Účinné a Energeticky Úsporné Chladicí Systémy Profilových Válců.

V rámci pedagogické činnosti vedl autor mezi roky 2015 – 2018 cvičení předmětu Matematika I. Dále byl školitelem bakalářské (2019) a diplomové práce (2020). Byl školitelem specialistou úspěšně obhájené dizertační práce s názvem: Optimization of Heat Transfer Surfaces of Heat Exchangers (2019) a je školitelem dizertační práce Vliv Napnutí Příčně Obtékaného Flexibilního Svazku Dutých Polymerních Vlákna na Tlakové Ztráty. Za zmínku stojí i úspěšné vedení 12 absolventských prací studentů VOŠ Sokolská Brno, kteří byli v rámci studia na praxi v Laboratoři přenosu tepla a proudění.

Autor se podílel na 15 publikacích ve WOS s 78 citacemi. 8 publikací má přidělený impakt faktor. H-index autora je 5 (2022).

1 ÚVOD

Zaměření autora habilitační práce je možné popsat jako experimentální výzkum přenosu tepla z kovových povrchů o vysokých teplotách za přítomnosti varu. Ve většině případů se jedná o sprchové chlazení, kde intenzita přenosu tepla závisí na mnoha parametrech a je navíc výrazně nelineárně ovlivněna povrchovou teplotou.

Z pohledu převažujících průmyslových aplikací experimentálního výzkumu se autor soustřeďuje na oblast hutnických procesů (kontinuálního odlévání, válcování a tepelného zpracování), kde je autorem nebo spoluautorem více než šedesáti výzkumných zpráv v projektech řešených přímo pro průmysl. V některých případech bylo možné získat od průmyslového partnera souhlas k publikování některých výsledků, avšak ve většině případů považují partneři tyto výsledky za citlivé a není je možné publikovat v časopisech či uvést detailní výsledky v habilitační práci.

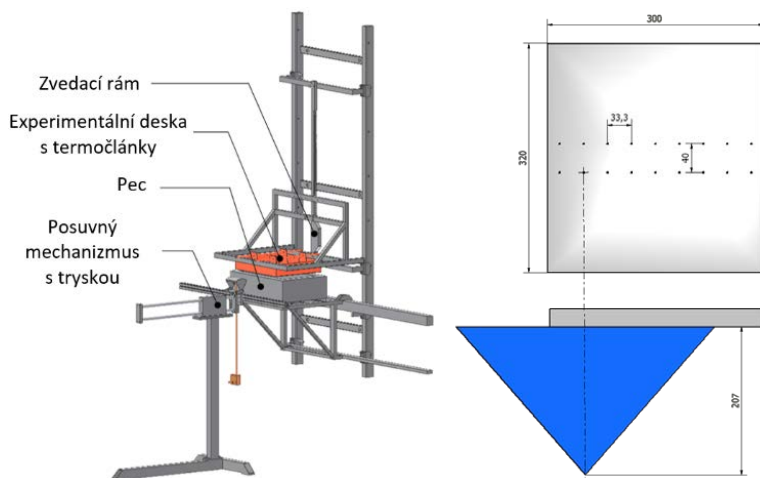
V habilitační práci jsou uváděny případy, kdy je spolu s proměnnou povrchovou teplotou zkoumán vliv dalších parametrů. Je to zejména tlak a množství chladicí kapaliny, vrstvy oxidů, teplota chladicí kapaliny atd. Pokud bychom zde zmínili nejzajímavější výsledky, tak bylo experimentálně prokázáno, že oxidická vrstva na ocelovém povrchu může zintenzivnit chlazení. Další zajímavá studie byla provedena v oblasti výzkumu sprchového chlazení s proměnnou teplotou chladicí vody. Byl zjištěn velmi výrazný rozdíl jak v chladicích intenzitách, tak ve velikosti Leidenfrostovy teploty, a to už při teplotních rozdílech vody o 20°C. V oblasti válcování se autor habilitační práce podílel na projektech souvisejících s optimalizací chladicích systémů pracovních válců s cílem zvýšit produkci a snížit provozní náklady v podobě nižšího množství použité chladicí kapaliny. V oblasti přímého tepelného zpracování, byly řešeny úlohy chlazení pásů válcovaných za tepla pomocí technologie chlazení laminárními vodními proudy a vodními tryskami. Autor habilitační práce se také podílel na vývoji vodních nožů, což je termín používaný pro sprchové systémy bránící volnému proudění kapaliny po chlazeném povrchu. Základní úlohou je v tomto případě nalezení vhodné interakce dynamického vodního paprsku s odstraňovanou vrstvou kapaliny. Za nejzajímavější, v oblasti tepelné zpracování, je možné považovat výzkum metod chlazení tenkých ocelových plechů, kde bylo cílem dosažení průměrných rychlostí chlazení až tisíc stupňů Celsia za sekundu. Přitom bylo nutné respektovat limity v použitém tlaku chladiva i v maximálních přípustných průtocích. Náročné práce byly provedeny při vývoji chladicích systémů pro online tepelné zpracování H-profilů a trub. V obou těchto případech je jasně daný požadavek na výslednou strukturu, která určuje užité vlastnosti.

Habilitační práce je rozdělena do pěti částí a je psána formou popisu nejzajímavějších úloh a jejich výsledků z výzkumného působení autora. První část je úvodní. V dalších třech částech jsou uvedeny výsledky v oblastech odlévání oceli, válcování a tepelného zpracování. V poslední kapitole jsou shrnuty výsledky v rámci této práce.

2 VÝZKUM V OBLASTI PLYNULÉHO ODLÉVÁNÍ OCELI

Plynulé odlévání oceli je proces, při němž je tekutá ocel odlévána do tvaru s požadovanými rozměry (brama, sochor, blok). Tekutá ocel je nalévána do krystalizátoru, v němž se vytvoří pevná fáze po obvodu předlitku, zatímco jádro je stále tekuté. Dále se odlitek pohybuje přes zóny sekundárního chlazení, které dochladí tekuté jádro do tuhého stavu.

K simulaci sekundárního chlazení v laboratorních podmínkách slouží zařízení, které se skládá z elektrické pece, posuvného rámu držícího experimentální desku s teplotními senzory a posuvného mechanismu s tryskou (Obr. 1 vlevo). Princip měření spočívá v ostřiku ohřátého povrchu za pohybu, kdy jsou zaznamenávány teploty a z nich je po skončení experimentu pomocí inverzní úlohy vypočítána závislost součinitele přestupu tepla α [$\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$] na povrchové teplotě T_s [$^{\circ}\text{C}$] a pozici ve směru pohybu trysky X [m], která je používána jako okrajová podmínka do modelů řízení plynulého odlévání oceli či simulací. Experimentální deska je vyrobena z austenitické oceli (1.4828) o rozměrech až 600 x 320 x 25 mm. Ta je osazena 18 termočlánky typu K o průměru 1,5 mm ve dvou řadách kolmých na směr pohybu trysky. Pozice po šířce dvojic termočlánků je označena písmeny A – G, kde pozice A je zpravidla v ose trysky (Obr. 1 vpravo).



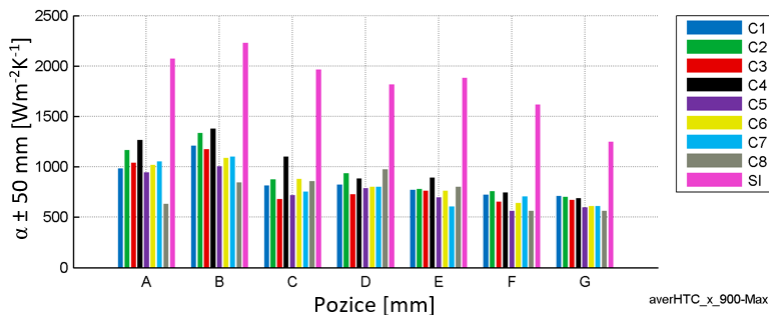
Obr. 1 Schéma experimentální zařízení pro měření přestupu tepla při pomalých rychlostech (vlevo), schéma experimentální desky s pozicí trysky (vpravo)

2.1 „PŘENOSITELNOST“ EXPERIMENTÁLNĚ ZÍSKANÝCH DAT NA AUSTENITICKÉ DESCE NA BĚŽNĚ ODLÉVANÉ OCELI

V rámci spolupráce se společností Arcelormittal byl testován vliv materiálu na velikost součinitele přestupu tepla. Bylo zde testováno celkem devět různých materiálů, které jsou stručně popsány v Tab. 1. Ostatní parametry chlazení byly identické pro všechny experimenty. Byla zde použita vodo-vzdušná tryska. Průměrné hodnoty na teplotním intervalu 900 – 1200 $^{\circ}\text{C}$ jsou zobrazené na Obr. 2. Pozice A – G odpovídají pozicím dvojici termočlánků po šířce experimentální desky. Výsledky ukázaly více než dvojnásobný nárůst součinitele přestupu tepla pro ocel s vyšším množstvím křemíku. Přítomnost oxidických vrstev křemíku zvýšila intenzitu chlazení oproti ostatním materiálům. Tento výzkum byl publikován v [1].

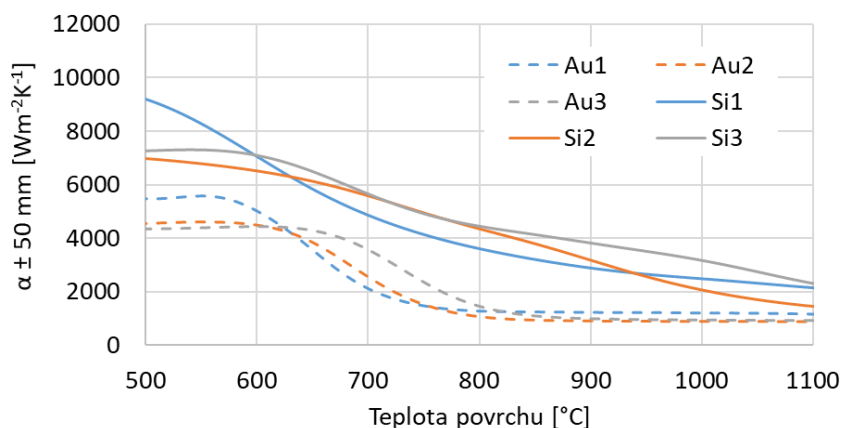
Tab. 1 Tabulka testovaných materiálů, publikováno v [1].

Označení	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9
Materiál	HC05A	1020	1050	1523B	1080	TRIP	Austenit	ULC	Si 2%



Obr. 2 Velikost průměrného součinitele přestupu tepla pro různé pozice p - o šířce desky a teplotní interval 900 – 1200°C, publikováno v [1].

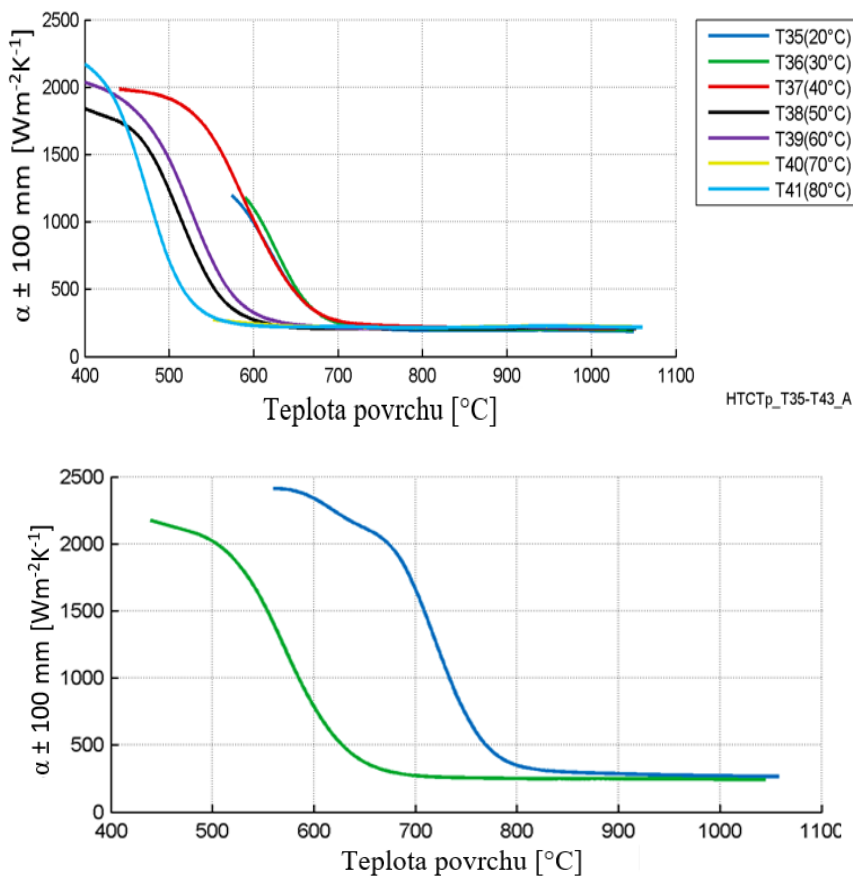
Experimenty s austenitickou a křemíkovou ocelí byly opakovány třikrát při stejném experimentálním nastavení. Pozorováním těchto experimentů byla zjištěna výborná odolnost austenitického vzorku proti narůstání silných oxidických vrstev. Naopak při opakovaném ohřevu křemíkové oceli docházelo k nárůstu tloušťky oxidických vrstev. Při prvním experimentu většina oxidů zůstala na povrchu. Při druhém experimentu došlo k postupnému odloupení horní vrstvy. U třetího experimentu došlo ihned během prvního průjezdu trysky k odstranění horní vrstvy oxidů. Avšak z dalšího pozorování během tohoto experimentu je zřejmé, že pod tou první vrstvou oxidů je další vrstva, z níž se odloupla pouze malá část. Z videozáznamů z experimentů je i zřejmé, že místa s oxidickými vrstvami jsou výrazně chladnější. Vliv oxidických vrstev na součinitele přestupu tepla je patrný z Obr. 3. Velikost součinitele přestupu tepla je nižší pro případ chlazení austenitické oceli. Podrobněji je tento jev studován v kapitole 4.3.



Obr. 3 Porovnání výsledků součinitele přestupu tepla pro experimenty s austenitickou a křemíkovou ocelí

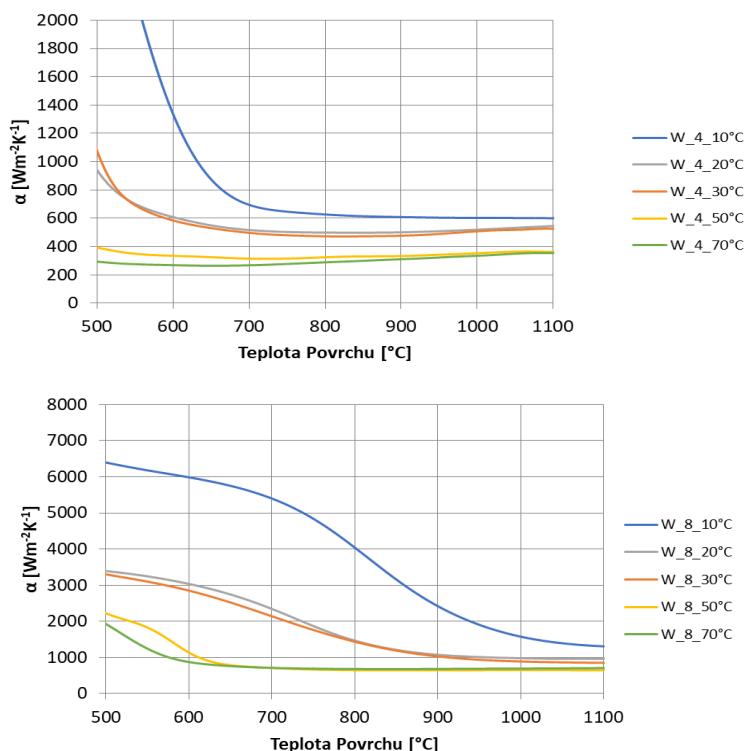
2.2 VLIV TEPLoty VODY NA INTENZITU CHLAZENÍ BĚHEM KONTINUÁLNÍHO ODLÉVÁNÍ

Dalším zajímavým projektem bylo studium vlivu teploty vody na velikost součinitel přestupu tepla. Tento jev byl již dříve popsán v [2] a zkoumán v rámci autorovi disertační práce [3]. V rámci této studie byla porovnána data vodo-vzdušných trysek s úhlem rozstříku 100°. Výsledky poukázaly na skokové změny Leidenfrostovy teploty pro různé teploty chladicí vody. (Obr. 4 hahoře). Další zajímavý výsledek ukázal i závislost Leidenfrostovy teploty na dalším parametru, a to tlaku potažmo průtoku vody. Po téměř dvojnásobném zvětšení průtoku vody ze 4,5 na 8 l min⁻¹ byl nalezen zásadní posun Leidenfrostovy teploty i mezi teplotami vody 20 a 40 °C (Obr. 4 dole). Výsledky tohoto výzkumu byly publikovány v [4].



Obr. 4 Vliv teploty vody na součinitel přestupu tepla, publikováno v [4]

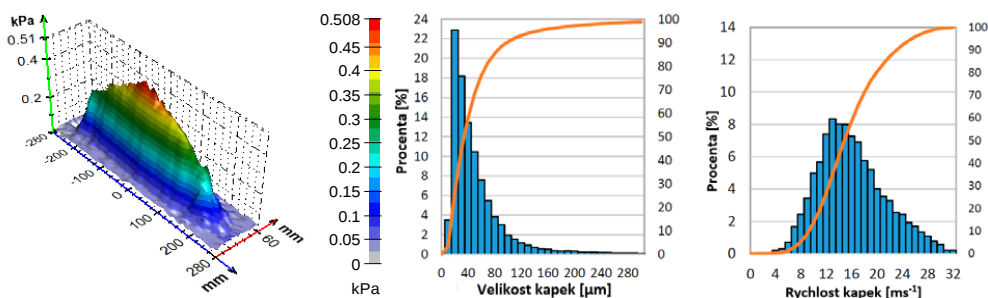
Dále byly provedeny další experimenty tentokrát s vodními tryskami Obr. 5. Je zde vidět jasná závislost Leidenfrostovy teploty na teplotě vody a zároveň průtoku (tlaku) vody jak pro vodo-vzdušné, tak i pro vodní trysky.



Obr. 5 Závislost součinitele přestupu tepla na povrchové teplotě pro vodní trysku s nižším průtokem (nahore), vyšším (dole) s různými teplotami vody

2.3 PREDIKCE LEIDENFROSTOVY TEPLoty POMOCÍ KORELACÍ

Leidenfrostova teplota je mnohdy chápána ve smyslu minima tepelného toku při blánovém varu. Po dosažení tohoto bodu dochází k proražení parní vrstvy a rapidnímu nárůstu tepelného toku. Ovšem mnohdy není jednoduché z experimentálních dat automaticky vyčíst minimum tepelného toku [5]. Během následujících korelací byla použita identifikace Leidenfrostovy teploty ze záznamu teploty na čase, tak jak je navrženo v [6] a [7]. Jedná se o teplotu, kde dochází k rapidnímu poklesu teploty, nárůstu rychlosti chlazení. Ve spolupráci s Arizona State University jsme se snažili o predikci Leidenfrostovy teploty pomocí korelací [7]. Nejprve byly získány hodnoty součinitele přestupu tepla pro 8 vodo-vzdušných a 2 vodní trysky od renomovaných výrobců. Dále byly provedeny měření hustoty dopadající vody, měření dopadajícího tlaku vody), měření velikosti a rychlosti kapek (Obr. 6).



Obr. 6 Příklad měřených impaktních tlaků, měření velikosti a rychlosti kapek pro jednu trysku, publikováno v [7]

Profesor Lee z Arizona State University použil získaná experimentální data pro studii, jejíž cílem bylo porovnat různé druhy korelací (predikujících Leidenfrostovu teplotu T_L) závislých na následujících parametrech: hustota dopadající vody Q_i [$\text{lm}^{-2}\text{s}^{-1}$], rychlost kapek v [ms^{-1}], Sauterův průměr kapek d_{32} [m], impaktní tlak dopadající vody I_m [Pa] (Obr. 6 vlevo), počet kapek na metr čtvereční za sekundu N [$\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$], kinetická energie kapek E [J], hybnost kapek H [kg ms^{-1}] a Reynoldsovo číslo Re . Tyto parametry byly známy celkem pro 24 experimentů. Na základě těchto měření bylo zjištěno 10 korelačních vztahů (kombinujících jednotlivé parametry), jejichž přesnost byla testována s měřeními hodnotami (Obr. 7). Korelace a porovnání relativních residuí byly provedeny prof. Lee a publikovány v [7]. Doporučené je tedy použít korelaci označenou Equation (1) s parametry průtok vody (Q_i), rychlost kapiček (v) a Sauterova průměru kapek (d_{32}).

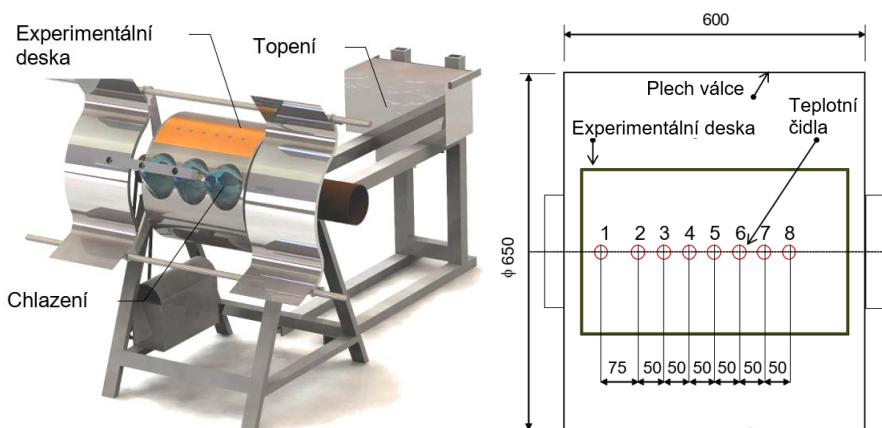
Table 2. List of correlations.

Correlation Number	Formula	Res ²
Equation (1)	$T_L = 351 \cdot Q_i^{0.111} \cdot v^{0.174} \cdot d_{32}^{0.006}$	2096
Equation (2)	$T_L = 706 \cdot N^{0.111} \cdot v^{0.174} \cdot d_{32}^{0.341}$	2096
Equation (3)	$T_L = 219 \cdot Re^{0.118} \cdot Q_i^{0.063}$	3724
Equation (4)	$T_L = 608 \cdot E^{0.014} \cdot Q_i^{0.116}$	4382
Equation (5)	$T_L = 410 \cdot E^{0.098} \cdot N^{0.089}$	2126
Equation (6)	$T_L = 287 \cdot H^{-0.026} \cdot Q_i^{0.184}$	4206
Equation (7)	$T_L = 294 \cdot H^{0.136} \cdot N^{0.145}$	2175
Equation (8)	$T_L = 825 \cdot I_m^{0.174} \cdot Q_i^{0.020}$	2521
Equation (9)	$T_L = 868 \cdot I_m^{0.186}$	2546
Equation (10)	$T_L = 474 \cdot Q_i^{0.141}$	4445

Obr. 7 Porovnání vztahů 1 – 10 založených na relativních residuí Res², publikováno v [7]

3 VÝZKUM V OBLASTI VÁLCOVÁNÍ

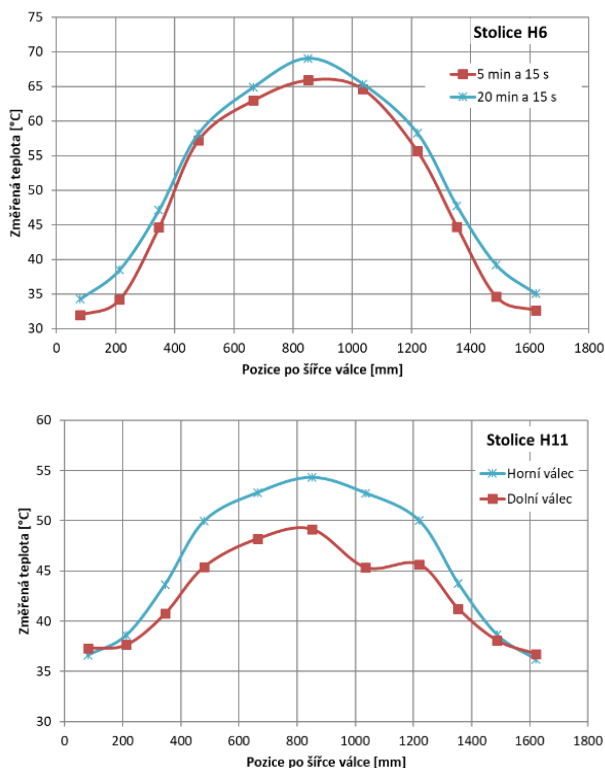
V oblasti válcování se autor zabýval problematikou chlazení válců za tepla i za studena s požadavky na zvýšení produkce a snížení energií v podobě uspořené množství chladicí vody. Pro studium chladicích systémů na rotujících površích, bylo vyvinuto laboratorní zařízení (Obr. 8 vlevo), které se skládá ze z rotujícího válce osazeného experimentální deskou s osmi teplotními čidly (Obr. 8 vpravo). Deska je vyrobena z nerezové oceli o rozměrech 500 x 320 x 25 mm. Vzdálenost termočlánků od povrchu je 0,6 mm. Tato deska je během experimentu ohřívána na teplotu 320°C. Mezi chladicími tryskami a válcem je umístěn deflektor, který je otevřen v okamžiku, kdy jsou všechny experimentální parametry nastaveny (rychlost a směr otáčení válce, tlak, průtok chladicího média). Po experimentu jsou změřené teploty (frekvence 320Hz) použity pro výpočet povrchových teplot a součinitele přestupu tepla.



Obr. 8 Schéma experimentálního zařízení pro simulaci chlazení na rotačních površích (vlevo), schéma experimentální desky s pozicí termočlánků (vpravo)

3.1 OPTIMALIZACE CHLAZENÍ PRACOVNÍCH VÁLCŮ A VERIFIKACE INTENZITY CHLAZENÍ V PRŮMYSLOVÝCH PODMÍNKÁCH

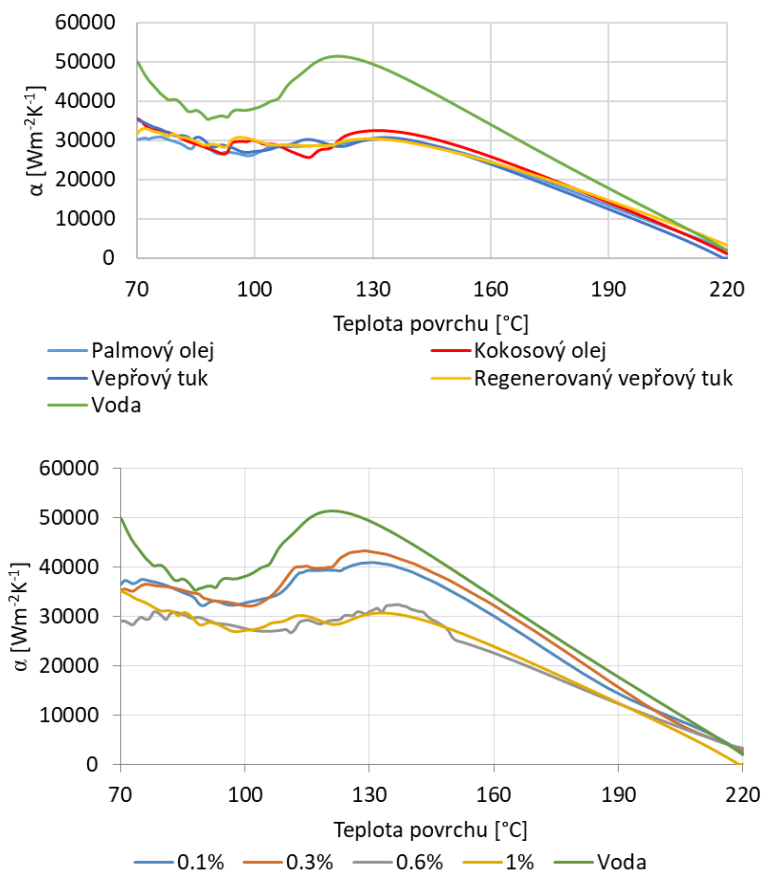
V oblasti válcování za tepla se autor zabýval problematikou optimalizace chlazení. Vývoj optimalizovaného chladicího systému je rozdělen do několika kroků. Nejprve je proměřena stávající konfigurace chlazení pro všechny optimalizované stolice. Na základě těchto výsledků a limitů získaných z výkresové dokumentace jsou navrženy změny v chladicím systému založené na rozsáhlé experimentální činnosti studující vliv několika parametrů na intenzitu chlazení. Typickými studovanými parametry jsou tlak vody, pozice a typ trysek, průtok vody apod. Optimalizace chlazení pracovních válců byla provedena v US Steel v Košice. Následně byla provedena verifikace nově nainstalovaného chladicího systému přímo na válcovací trati, na níž se autor podílel. Měření probíhala pomocí speciální měřicí lišty vyvinuté v Laboratoři přenosu tepla a proudění, která umožňuje měřit kontaktní teploty v různých bodech po šířce válce. Teploty pracovních válců po válcování, byly naměřeny na všech stolicích. Ukázka posouzení chlazení v USS Košice je zobrazena na Obr. 9. Nahoře je uveden příklad změřených teplot na válci stolice H6, 5 a 20 minut po projetí posledního provalku. Na dolním obrázku je pak vidět rozdíl naměřených teplot pro horní a dolní válec stolice H11. Na základě těchto měření byla verifikována funkčnost chladicího systému a byly zde navrženy drobné změny.



Obr. 9 Příklady výsledků měření teplot pracovních válců po válcování v USS Košice, rozdíl mezi teplotou válce 5 a 20 minut po průjezdu posledního provalku (nahore) a rozdíl mezi teplotami horního a dolního válce jedné stolice (dole)

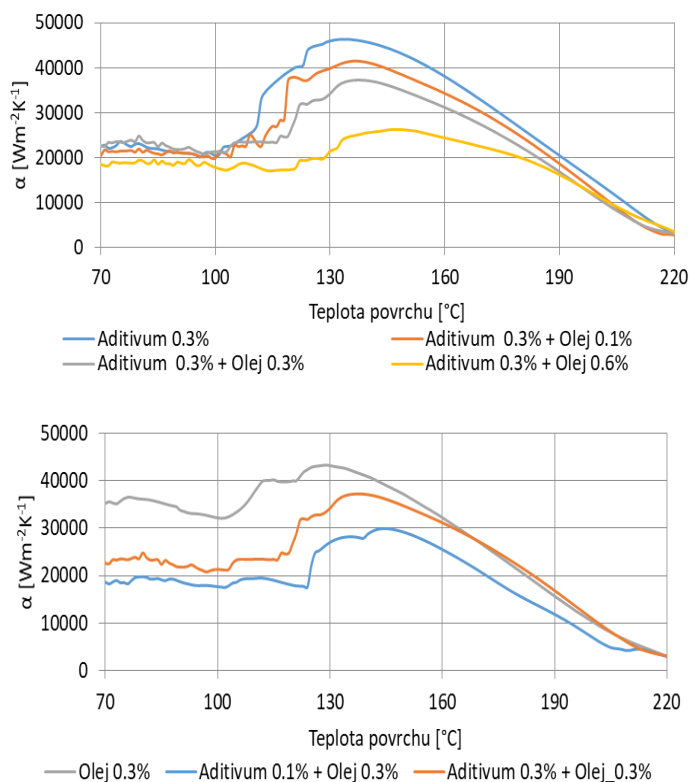
3.2 OPTIMALIZACE CHLAZENÍ PRACOVNÍCH VÁLCŮ PŘI VÁLCOVÁNÍ ZA STUDENA

V rámci řešení evropského projektu MANCOOL byl prováděn výzkum v oblasti válcování za studena. Hlavním cílem tohoto projektu bylo zvýšit rychlost válcování a tím i produktivitu v TATA steel Nizozemí. Při zvyšování rychlosti válcování docházelo k přivařování mikro-povrchů plechu k válci a následnému vytržení části povrchu plechu, což se posléze projevovalo formou periodicky se opakujících vad na válcovaném povrchu. S rostoucí vzdáleností válcovaného plechu zvyšoval. Tato zjištění vedla k tezi, že povrchové vady způsobuje špatné mazání a chlazení válců. My jsme se zaměřili na problematiku v oblasti chlazení. První částí tohoto projektu bylo studium vlivu různých emulzí a příměsí na intenzitu chlazení. Nejprve byla provedena literární rešerše. Publikace [8] - [13] slibně ukazovaly prostor pro zlepšení chlazení i za pomoci aditiv. Ovšem statické experimentální testy neprokázaly vliv různých druhů emulzí na velikost součinitele přestupu tepla (Obr. 10 nahore). Dále byl zkoumán vliv množství oleje na velikost součinitele přestupu tepla. Bylo prokázáno, že s rostoucím množstvím oleje ve vodě klesá součinitel přestupu tepla (Obr. 10 dole).



Obr. 10 Ukázka vlivu různých emulzí na součinitel přestupu tepla (nahore) a různých koncentrací oleje (dole), publikováno v [14]

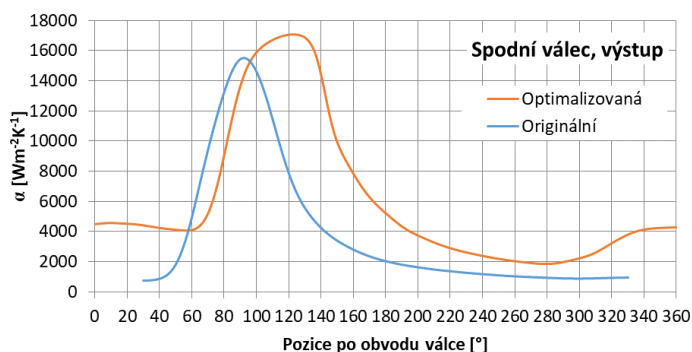
Dalším krokem ve výzkumu bylo přidání malého množství aditiva Bonderite L-AD EP 5501. Při prvních testech bylo aditivum smícháno pouze s vodou. Aditivum, podobně jako oleje, snižuje velikost součinitele přestupu tepla. Dále byly testovány různé kombinace koncentrací aditiv a olejů ve vodě. Nejprve byly provedeny experimenty s konstantním množstvím aditiva a poté s konstantním množstvím oleje. Při konstantním množství aditiva klesá součinitel přestupu tepla s rostoucí koncentrací oleje v emulzi. Naopak při konstantním množství oleje, součinitel přestupu tepla roste s rostoucí koncentrací aditiv (Obr. 11).



Obr. 11 Výsledky experimentů s konstantním množstvím aditiv a rostoucím množstvím oleje v emulzi (nahore) a pro konstantní množství oleje v emulzi (0,3%) a rostoucímu podílu aditiva (dole), publikováno v [14]

Druhou částí projektu byla optimalizace chlazení pracovních válců pomocí změny geometrie ostříku. V tomto případě bylo použito zařízení pro simulaci chlazení rotačních povrchů. V první fázi zde byla zjištěna intenzita chlazení pro stávající konfiguraci používanou v TATA steel.

Dále byla navržena nová konfigurace chlazení pro druhou válcovací stolicí pomocí série experimentů, kdy byl studován vliv natočení trysek (kolem své osy), typů trysek, průtoku, tlaku vody apod. Ukázka porovnání součinitele přestupu tepla pro originální a novou, optimalizovanou konfiguraci (výstup, spodní válec) je zobrazena na Obr. 12. Optimalizace zvýšila velikost součinitele přestupu tepla a chladičí plochu. Spotřeba emulze byla snížena až o 34%.



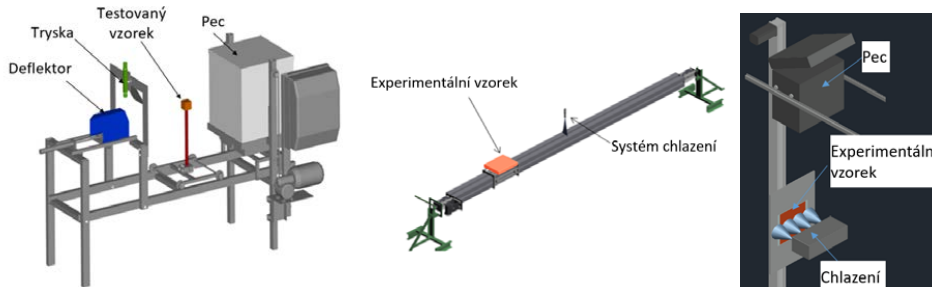
Obr. 12 Ukázka porovnání originální a optimalizované konfigurace chlazení spodní válce na výstupní straně provalku, publikováno v [14]

Pomocí znalosti okrajových podmínek pro stávající a optimalizovaný chladicí systém byly provedeny simulace chlazení pracovního válce pomocí programu Simroll. Tyto simulace ukázaly obrovskou nevýhodu v podobě teploty emulze, která se pohybuje mezi 50 až 60°C. Teplota povrchu pracovního válce byla pomocí optimalizace chlazení snížena ze 79 na 73 °C. Benefit investice do nového chlazení by byl tedy v úspoře vody a snížení teploty válce o 6°C. Pokud by se však podařilo snížit tepotu emulze na 20°C, došlo by k poklesu povrchové teploty válce o 34°C.

4 VÝZKUM V OBLASTI TEPELNÉHO ZPRACOVÁNÍ

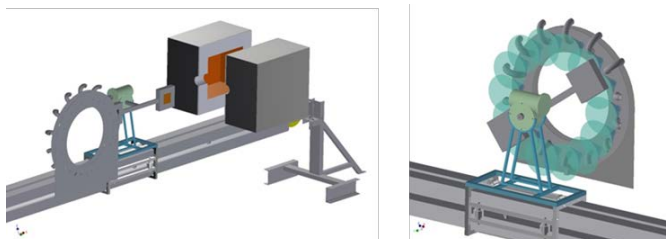
V Laboratoři přenosu tepla a proudění byly vyvinuty čtyři experimentální zařízení, na nichž je možné provádět testy pro tepelné zpracování. První zařízení umožňuje provádět zkoušku prokalitelnosti (Obr. 13 vlevo). Skládá se z pece, trysky, posuvného vozíku pro vzorek a deflektoru, jež umožňuje posun vzorku z pece do pozice pod trysku, aniž by došlo k ostříknutí povrchu vodou. Princip měření je podobný Jominiho zkoušce prokalitelnosti s tím rozdílem, že je zde použit originální tvar produktu (část trubky, hlava kolejnice apod.). Vzorek je osazen teplotními senzory pro sledování teplotního režimu. Po tepelném zpracování vzorku jsou zkoumány jeho materiálové vlastnosti.

Další dvě experimentální zařízení slouží pro simulaci chlazení vertikálně a horizontálně se pohybujících produktů (Obr. 13 uprostřed a napravo). Skládají se z nosného kovového rámu, na němž je umístěn pohybující se vozík. K tomuto vozíku je připevněn experimentální vzorek s teplotními senzory. Vzorek je nejprve ohřát v peci na požadovanou startovací teplotu a poté je reverzně posouván požadovanou rychlostí skrz chladicí sekci. Po ukončení experimentu jsou změřené teploty použity pro výpočet povrchové teploty, součinitele přestupu tepla a tepelného toku.



Obr. 13 Schéma zařízení pro zjišťování prokalitelnosti ocelových vzorků (vlevo), zařízení pro simulaci horizontálně (uprostřed) a vertikálně (vpravo) pohybujících se povrchů

Posledním, čtvrté, zařízení umožňuje simulovat chladicí sekci v reálné délce, v laboratorních podmínkách. Lineární posuv vzorku je transformován do rotace. Zařízení umožňuje simulovat dva režimy chlazení s různou intenzitou (Obr. 14). Reálný vzorek je umístěn na otáčivé rameno, vsazen do pece a ohřát na požadovanou teplotu. Poté je zapnut ostřík. Voda proudící z trysek je odkláněna pomocí deflektoru. Rameno je vysunuto z pece, roztočeno a přemístěno na pozici před trysky. Deflektor je pootočen a trysky začnou ostříkávat povrch vzorku. Deflektor je ovládaný počítačem, což umožňuje přesné časování přepínání mezi chladicími režimy: intenzivní, jemné a vypnuté chlazení. Ve vzorku jsou umístěny termočlánky pro kontrolu teplotního režimu. Vzorek je po sléze vyřezán z ramene a podroben metalurgickým testům.



Obr. 14 Zřízení pro simulaci reálných chladicích systému

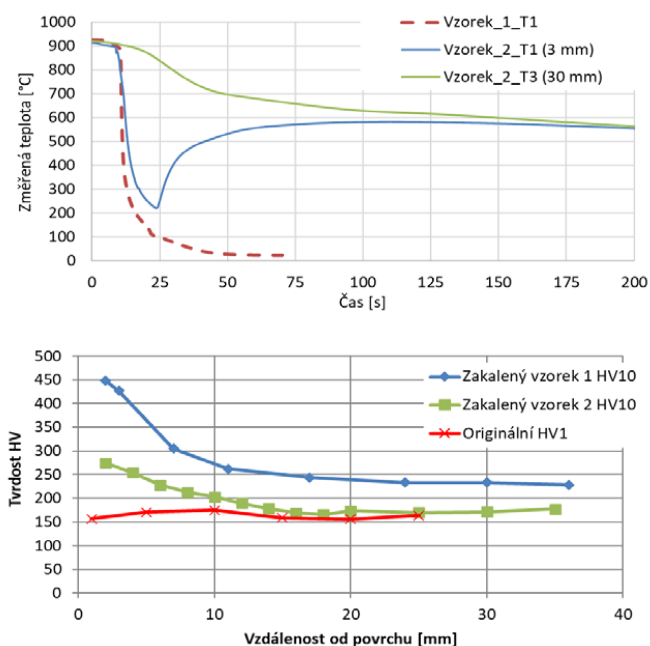
4.1 PROCES VÝVOJE CHLADICÍHO ZAŘÍZENÍ PRO TEPELNÉ ZPRACOVÁNÍ

Proces vývoje chladicího systému bychom mohli rozdělit do čtyřech fází. Příklad postupu vývoje chladicího zařízení bude prezentován na výzkumu tepelného zpracování H-profilu pro Primetals Technologies.

Do první fáze vstupují požadavky metalurgů na chladicí systém. V této fázi je provedena modifikovaná Jominiho zkouška prokalitelnosti. Pro tento účel byla vybrána ocel S355J2 s uhlíkovým ekvivalentem 0.46 % (Tab. 2). Dva vzorky prošly různými režimy chlazení (Obr. 15 nahoře). Oba vzorky byly po zakalení rozříznuty a změřené tvrdosti před a po zakalení byly porovnány (Obr. 15 dole). K měření tvrdosti byl použit přístroj Innovatest Nexus 4303. Z porovnání je patrné zvýšení tvrdosti po tepelném zpracování.

Tab. 2 Chemické složení S355 J2 použité pro zkoušky prokalitelnosti

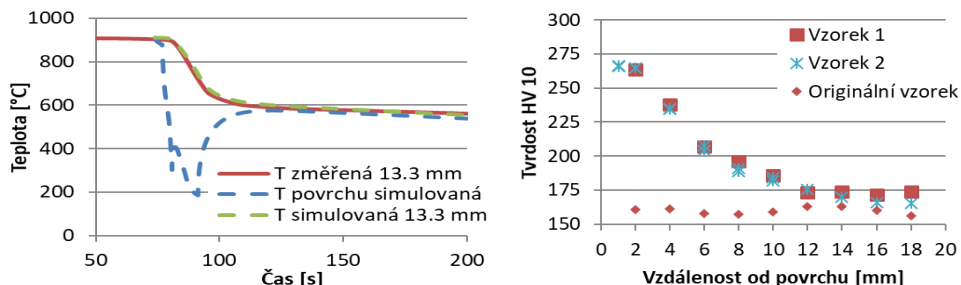
C	Mn	Cr	Mo	V	Ni	Cu
0.181	1.520	0.070	0.005	0.003	0.050	0.060



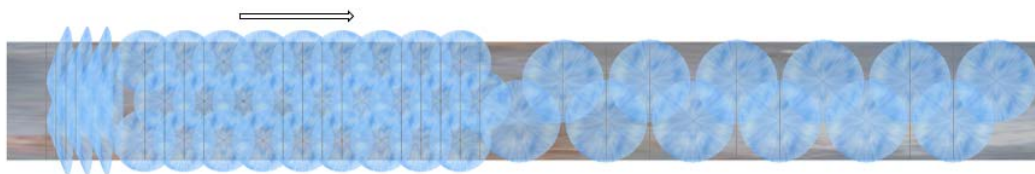
Obr. 15 Teplotní režimy pro Vzorek 1 a 2 (nahoře), porovnání naměřených tvrdostí pro oba zakalené vzorky a nezakalený (originální) materiál (dole)

Druhou fází návrhu chladicích sekcí jsou testy intenzity chlazení. Cílem této části je vytvořit první návrh chladicího zařízení, které bude schopné splnit požadavky na režim chlazení. Jedná se o rozsáhlou experimentální činnost, kdy jsou studovány vlivy různých parametrů na intenzitu a homogenitu chlazení. Těmi parametry jsou zpravidla: pozice, velikosti a typy trysek, úhel natočení a sklonu trysek, tlak či průtok vody apod. Získaná data jsou použita jako okrajové podmínky pro simulace reálné chladicí sekce [17]. Jakmile simulace potvrdí správnou funkčnost návrhu chladicí sekce, je nutné ji před průmyslovým nasazením verifikovat. K tomuto účelu je použito experimentální zařízení pro simulaci nekonečně dlouhých sekcí. Porovnání změřené a simulované teploty včetně změřené tvrdosti je zobrazena na Obr. 16. Změřená teplota

se velmi dobře shoduje se simulovanou (hloubka 13,3 mm od chlazeného povrchu). Dále je vidět zvýšení tvrdosti vzorku až do hloubky 10 mm. Po této verifikaci je vytvořena finální podoba chladicí sekce (Obr. 17).

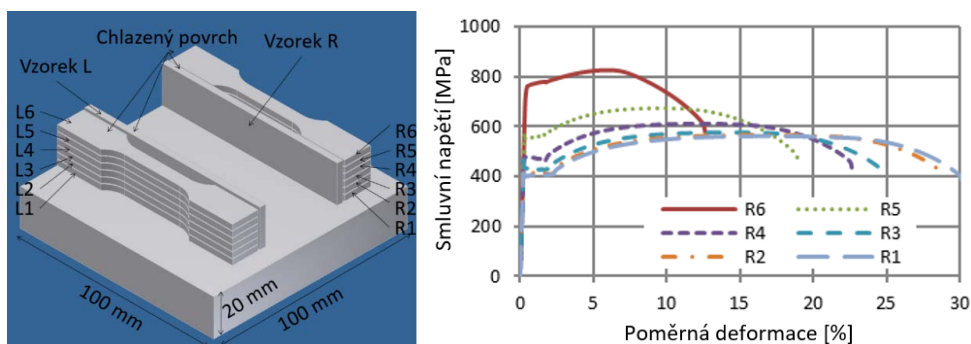


Obr. 16 Příklad porovnání simulované a reálné teploty vzorku, který byl zchlazen použitím zařízení Karusel (nalevo) a změřený profil tvrdosti pro první vzorek a ještě jeden po tepelném zpracování (napravo), publikováno v [18]

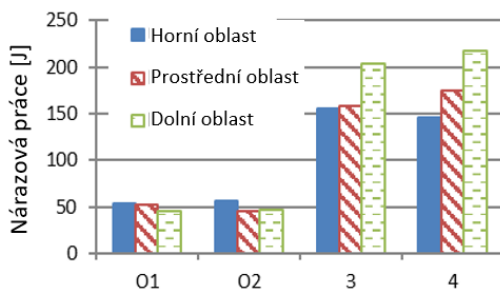
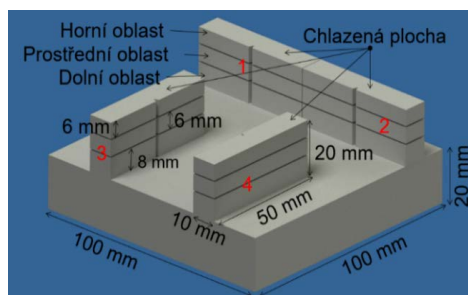


Obr. 17 Ukázka navržené části chladicí sekce pro tepelné zpracování H-profilu

Posledním krokem jsou testy mechanických vlastností. Tyto testy provádíme ve spolupráci s Ústavem materiálových věd a inženýrství, Fakulty strojního inženýrství, VUT v Brně. Zkoumaným tepelně zpracovaným vzorkem byla ocel S355J2 s uhlíkovým ekvivalentem 0,41 %. Na vzorcích byly provedeny tahové zkoušky a testy vrubové houževnatosti při teplotě -20°C . Vzhledem k tomu, že pro materiál s heterogenním rozložením tvrdosti po tloušťce jsme nenašli žádný standard pro testování, rozhodli jsme se rozřezat vzorek po tloušťce na jednotlivé vrstvy (Obr. 18 and Obr. 19 nalevo). Výsledky jsou zobrazeny na Obr. 18 a Obr. 19 napravo. Všechny tyto testy byly provedeny podle příslušných norem ČSN EN ISO 6892-1 a ČSN EN ISO 148-1.



Obr. 18 Schéma výroby vzorků pro tahovou zkoušku tepelně zpracovaného materiálu (nalevo), výsledky tahových zkoušek (napravo), publikováno v [18]

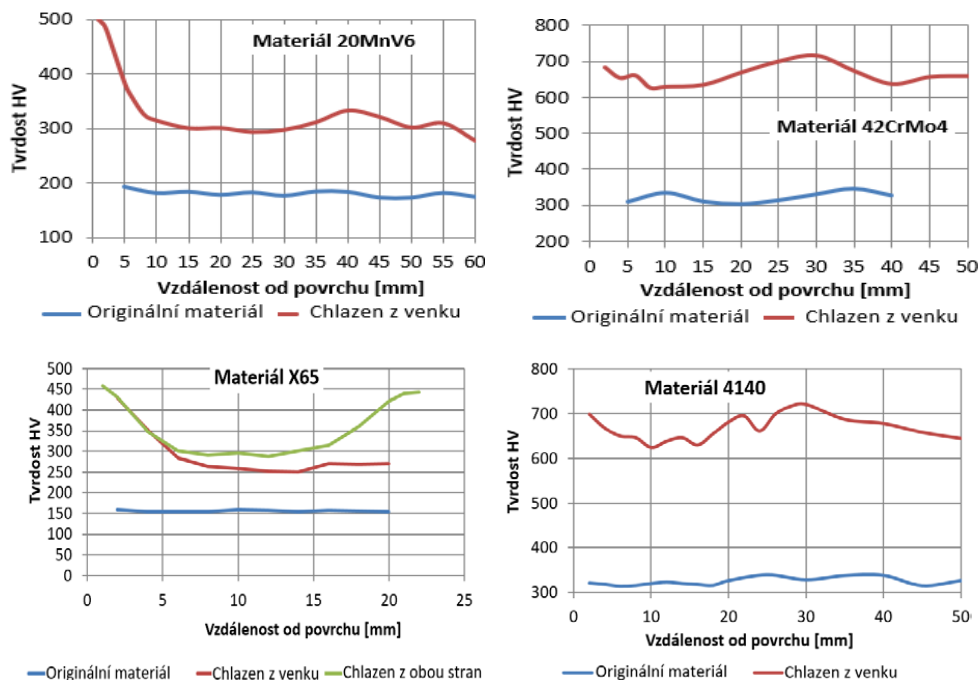


Obr. 19 Schéma výroby vzorků pro Charpyho test tepelně zpracovaného materiálu (nalevo), výsledky testů (napravo) – 0 originální nechlazené vzorky, 3 a 4 jsou tepelně zpracované vzorky, publikováno v [18]

4.2 VÝVOJ ZAŘÍZENÍ PRO TEPELNÉ ZPRACOVÁNÍ TRUBEK

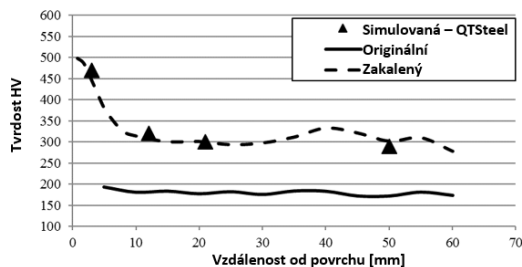
V rámci spolupráce s Třineckými železárnami a.s., ITA s.r.o a BKB Metal a.s. byl navržen, vyroben a instalován funkční prototyp chladičského zařízení bezešvých ocelových trubek pro OCTG (Oil Country Tubular Goods). Výsledky z tohoto výzkumu byly publikovány v [19] a [20].

Metodika výzkumu uvedená v 4.1 byla použita i v tomto případě s tím, že testy mechanických vlastností byly prováděny v Třineckých železárnách. Nejprve byly provedeny zkoušky prokalitelnosti různých ocelí – 20MnV6, 4140, 42CrMo4 či x65Q. Příklady výsledných tvrdostí po zkoušce prokalitelnosti jsou uvedeny na Obr. 20.



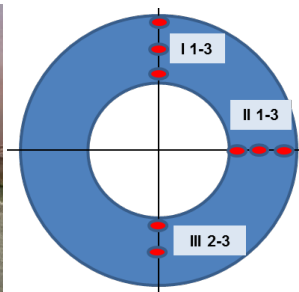
Obr. 20 Výsledná tvrdost po testech prokalitelnosti. Ostřík byl proveden z venkovní strany vzorku (trubky) a i z vnitřní (pouze pro X65) publikováno v [19]

Dalším krokem byly laboratorní testy pro studium parametrů ovlivňujících intenzitu chlazení. Běžně studovanými parametry byly: tlak/průtok vody, typ trysky, úhel natočení trysek, rychlost posuvu atd. Při těchto testech byla zároveň studována homogenita chlazení. Nehomogenní chlazení může vést k heterogenním mechanickým vlastnostem a deformacím trubky [21]. Na základě získaných okrajových podmínek z laboratorních testů mohly být provedeny numerické simulace různých režimů chlazení. Tepelné a materiálové predikce byly provedeny společností ITA pomocí softwaru QTSteel (Obr. 21 nalevo). Prototyp chladicí sekce instalované v Třineckých železárnách je zobrazen na Obr. 21 vpravo)

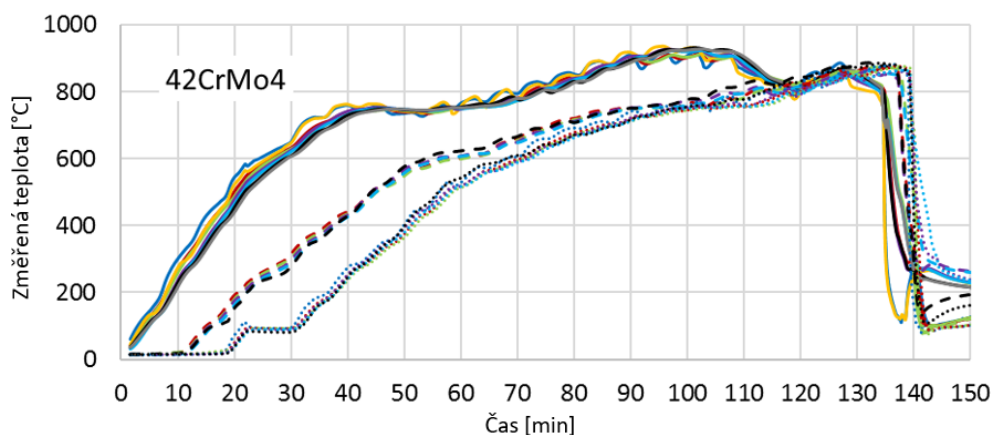


Obr. 21 Porovnání predikované tvrdosti na základě simulací s výsledky tvrdostí z Jominiho zkoušek, publikováno v [20]

Tento projekt dále pokračoval testováním chlazení v reálných podmínkách v rámci dotačního projektu Trio. Do reálných trubek byly navařeny tři prstence se zabudovanými termočlánky po obvodu (Obr. 22). První prstenec byl umístěn na začátku trubky, druhý prstenec uprostřed trubky a třetí prstenec byl umístěn na konci trubky. Následně byly termočlánky připojeny do speciálního dataloggeru, který byl ukryt v chráněném termoizolačním boxu navrženém v Laboratoři přenosu tepla a proudění. Tento kryt byl přivařen na konec trubky. Trubky s dataloggerem posléze projely tunelovou pecí a chladicím systémem. Třineckým železárnám byly předány průběhy změřených teplot (příklad dat na Obr. 23). Výsledky z těchto měření pomohly optimalizovat potřebný tlak vody pro chlazení a rychlost posuvu trubky.



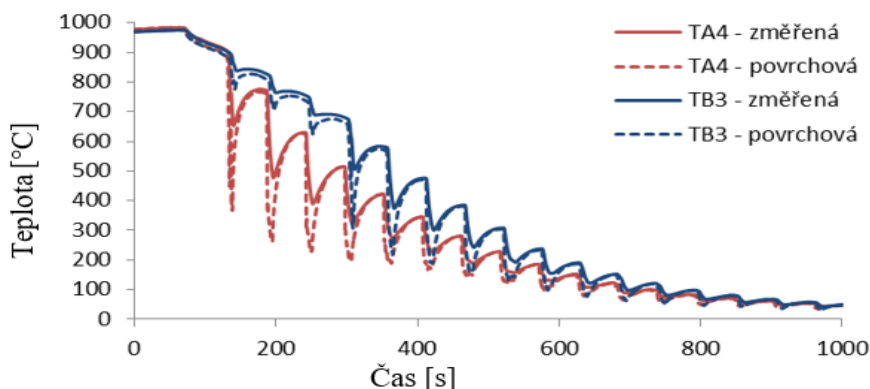
Obr. 22 Navařený prstenec s termočlánky na trubce (vlevo), schéma pozice termočlánků v prstenci (uprostřed) a trubky s přivařenými prstenci (napravo)



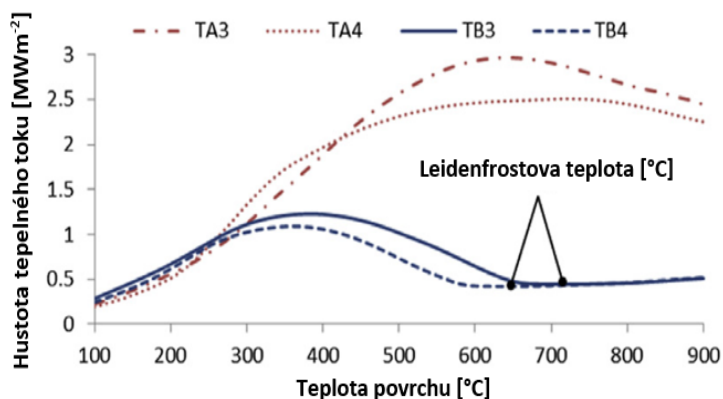
Obr. 23 Změřené teploty v různých pozicích na trubce z materiálu 42CrMo4, publikováno v [20]

4.3 VLIV OXIDICKÝCH VRSTEV NA VELIKOST SOUČINITELE PŘESTUPU TEPLA PŘI TEPELNÉM ZPRACOVÁNÍ

V rámci spolupráce s firmou Posco v Jižní Koreji byla provedena rozsáhlá experimentální studie chlazení tenkých plechů s důrazem na intenzitu a hlavně homogenitu chlazení. Ukázalo se, že oxidické vrstvy mohou zvyšovat intenzitu chlazení, což bylo popsáno v disertační práci autora [3] a v publikacích [23] a [24]. Na základě předchozí studie byla provedena další experimentální analýza, kdy byla část zokoujené austenitické experimentální desky (materiál 1.4828, 25 mm tloušťka) odmořena (oblast A). Zokoujený povrch byl označen jako oblast B. Deska byla osazena termočlánsky ve vzdálenosti 2 mm od povrchu, ohřata na počáteční teplotu 1000°C a poté ochlazena na teplotu 100°C. Rozdíl ve změřených a vypočtených povrchových teplotách je uveden na Obr. 24. Porovnáním teplot bylo potvrzeno, že oblast A (s vyšší oxidickou vrstvou a porositou oxidu) byla chlazená s vyšší intenzitou než oblast B. Bylo to způsobeno právě posunem Leidenfrostovy teploty (Obr. 25).



Obr. 24 Vývoj povrchových teplot pro teplotní senzory v oblasti A a B, publikováno v [23]

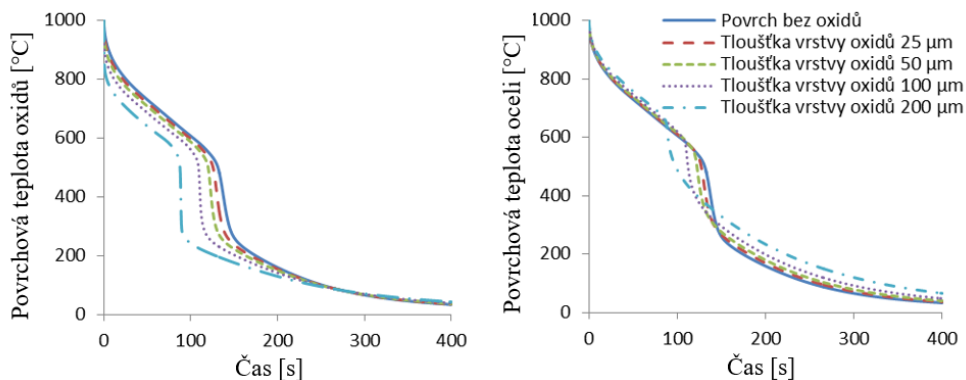


Obr. 25 Hustota tepelného toku v závislosti na teplotě povrchu, publikováno v [23]

Na základě předešlých výsledků byly provedeny simulace [23] a [24], které ukázaly vliv Oxidických vrstev na povrchovou teplotu oxidu a oceli pro různé oxidické tloušťky (Obr. 26). Termofyzikální vlastnosti použité v modelu jsou specifikovány v Tab. 3.

Tab. 3 Termofyzikální vlastnosti použité při simulaci [23]

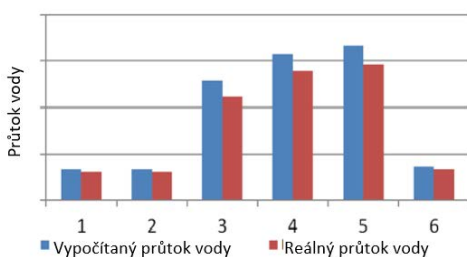
Tepelná vodivost [$\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$]		Měrná tepelná kapacita [$\text{J Kg}^{-1}\text{K}^{-1}$]		Hustota [Kg m^{-3}]	
oxid	ocel	oxid	ocel	oxid	ocel
0.5	23.4	883	594	5200	7550



Obr. 26 Porovnání simulovaných povrchových teplot oxidů a oceli (pod oxidem) pro různé tloušťky oxidických vrstev, publikováno v [23] a [24]

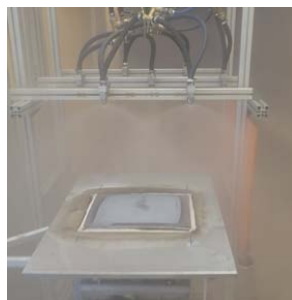
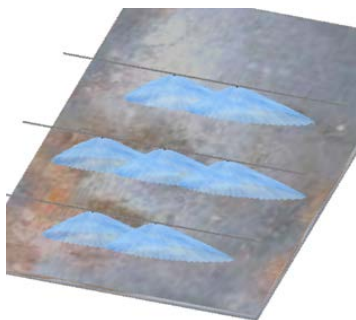
4.4 VÝVOJ CHLADICÍCH SYSTÉMU PRO TEPELNÉ ZPRACOVÁNÍ HORIZONTÁLNĚ SE POHYBUJÍCÍCH PLECHŮ

Cílem úvodní studie bylo navrhnout chladicí zařízení pro tepelné zpracování nerezových plechů o tloušťkách mezi 1 – 6 mm, kde je nutné chladit homogenně s nízkou spotřebou vody, avšak s vysokou intenzitou, aby se předešlo precipitaci karbidů. Pro tyto účely byl použit stand pro studium přestupu tepla na horizontálně se pohybujících površích. Jako experimentální vzorek byly použity austenitické tenké plechy o tloušťce 1,5 mm. Byla provedena rozsáhlá studie parametrů ovlivňujících velikost součinitele přestupu tepla např. vliv tlaku vody, vliv rychlosti posuvu, či vliv gravitace (chlazení ze spodu a z vrchu). Na základě získaných experimentálních dat byla navržena, vyrobena a instalována chladicí sekce v Číně. Na této spolupráci byla zajímavá hlavně verifikace správnosti okrajových podmínek, které Fives Stein použil pro predikci délky chladicí sekce a stanovení průtoku vody. Na obrázku Obr. 27 je vidět porovnání vypočítaných průtoků vody na základě simulací chlazení a reálných průtoků vody pro 6 různých režimů chlazení. Jednotky jsou bezrozměrné z důvodu utajení. Výsledky tohoto výzkumu byly publikovány v [25] a [26].



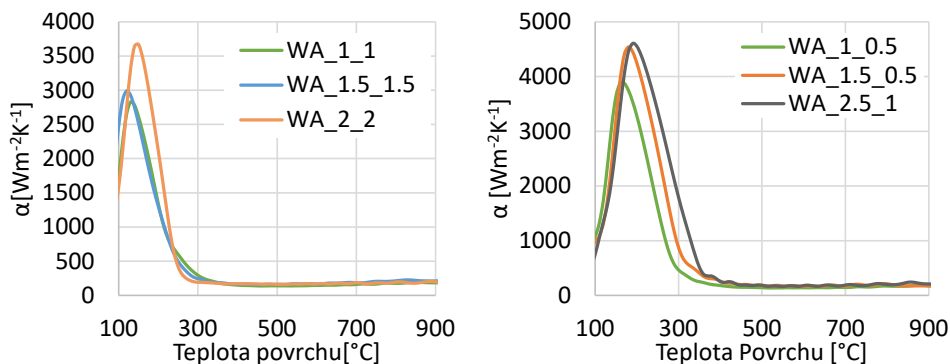
Obr. 27 Porovnání predikovaných (vypočítaných) průtoků s reálnými pro 6 různých režimů chlazení (vlevo), rovinnost plechu po vyjetí z chladicí sekce (napravo), publikováno v [26]

Dalším zajímavým projektem bylo tepelné zpracování plechů pomocí vodo-vzdušných trysek. Fives Stein byl požádán Čínskou společností, aby navrhnul a instaloval chladicí sekci složenou z vodo-vzdušných trysek vzhledem k tomu, že tuto technologii používal jejich konkurent. Cílem laboratorních prací bylo charakterizovat součinitel přestupu tepla pro chladicí sekci složenou z trysek Lechler 148.528.17.56. Schéma laboratorní chladicí sekce je zobrazeno na Obr. 28. Pro tyto měření bylo použito zařízení Lineární stand (Obr. 13 vprostřed). Každý experimentální plech o tloušťce 1.5 mm byl osazena 11 teplotními čidly po šířce plechu s ekvidistantní vzdáleností 10 mm. Rychlost posuvu byla stanovena na $0,5 \text{ ms}^{-1}$.

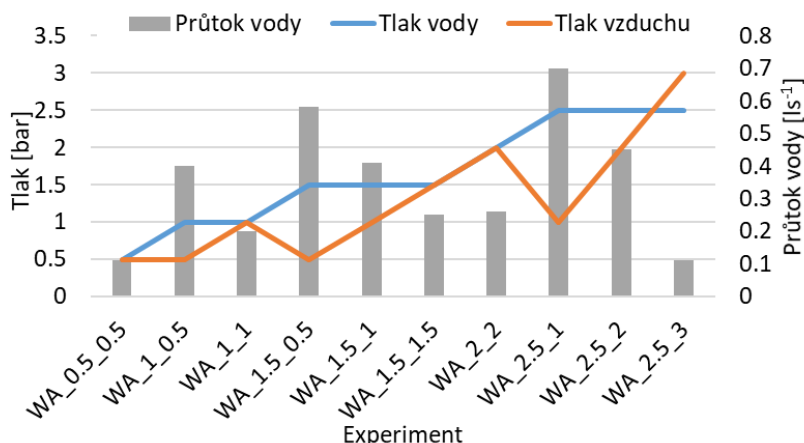


Obr. 28 Schéma chladicí sekce složené z vodo-vzdušných trysek (vlevo) a experimentální plech vjíždí do chladicí sekce

Různé kombinace nastavení tlaků vody a vzduchu byly studovány s cílem najít součinitele přestupu tepla a porovnat homogenitu chlazení. Vzhledem k tomu, že se jednalo o velmi slabé chlazení s vysokými překryvy trysek, bylo toto chlazení homogenní pro experimenty se všemi kombinacemi tlaku vody a vzduchu. Výsledky z těchto experimentů například ukázaly, že se zvyšujícím se tlakem vody (konstantní tlak vzduchu) roste Leidenfrostova teplota. Ovšem se zvyšujícím se tlakem vzduchu (konstantní tlak vody) byly výsledky srovnatelné v případech, kdy byl tlak vzduchu nižší než tlak vody. Ke snížení Leidenfrostovy teploty došlo až ve chvíli, kdy tlak vzduchu byl roven nebo vyšší než tlak vody. Z grafů uvedených na Obr. 29 je evidentní, že velikost součinitele přestupu tepla i Leidenfrostova teplota je srovnatelná pro všechny tři zmíněné kombinace na obrázku vlevo, což je dáno tím, že tyto kombinace mají podobný průtok vody (Obr. 30). Ovšem se zvyšujícím se průtokem vody, roste Leidenfrostova teplota (Obr. 29 vpravo).



Obr. 29 Porovnání velikostí součinitele přestupu tepla pro kombinace se stejnými tlaky vody a vzduchu (vlevo) a porovnání součinitele přestupu tepla pro zvyšující se průtoky vody (vpravo)



Obr. 30 Závislost měřeného průtoku vody pro různé kombinace tlaku vzduchu a vody

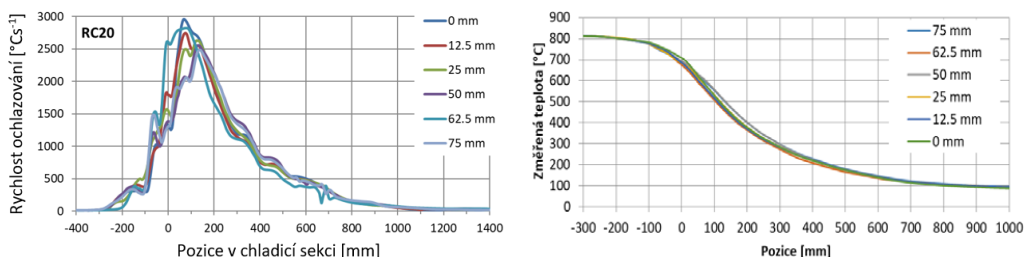
V rámci další spolupráce se společností Fives Stein už byly vyvíjeny a studovány pouze chladicí systémy plechů, které se pohybují vertikálně. Z tohoto důvodu byly veškeré testy prováděny pouze na zařízení pro simulaci chlazení vertikálně se pohybujících povrchů (Obr. 13 vpravo). V rámci této spolupráce bylo charakterizováno či vyvinuto nejméně pět dalších chladicích zařízení pro ArcelorMittal v USA, SSAB ve Švédsku, Hyundai steel v Jižní Koreji a Posco v Jižní Koreji.

Velmi zajímavým projektem bylo vyvinout chladicí systém, který by umožnil homogenně zchladit 2 mm tenký plech s rychlostí ochlazování vyšší než $1\,000\text{ °C s}^{-1}$. Samotná chladicí sekce se skládala ze dvou částí – vodního nože, který má za úkol odstranit veškerou stékající a odraženou vodu z povrchu plechu. Druhou částí je samotné chladicí zařízení. Nejprve byly provedeny studené testy, které měly za cíl najít alespoň dvě fungující konfigurace vodního nože, pro testy jejich vlivu na velikost součinitele přestupu tepla. Ukázka jedné z testovacích konfigurací je zobrazena na Obr. 31. Výsledky ze studených testů ukázaly, že vodní nůž je funkční pro úhly dopadu mezi 20 a 40°. Dalšími testy už za vysokých teplot byl zjišťován vliv dopadového úhlu vody na velikost součinitele přestupu tepla. Ukázalo se, že úhel dopadu vody 30° z vodního nože chladí nejintenzivněji [27].



Obr. 31 Ukázka chladicí sekce při studených testech (vlevo), ukázka ze studeného testu (uprostřed), ukázka chladicí sekce pro teplotní testy (vpravo)

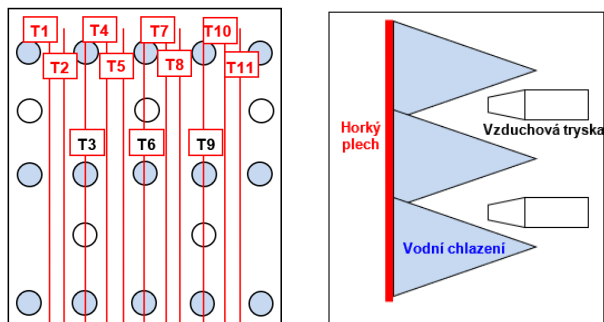
Dalším krokem byly teplotní testy, při kterých byla provedena optimalizace chlazení s ohledem na homogenitu chlazení, spotřebu vody a vysokou rychlost ochlazování. Celkem bylo testováno přes 20 různých konfigurací. Maximální dosažená rychlost ochlazování pro střed plechu (hloubka 1 mm) je zobrazena na Obr. 32 společně s homogenitou chlazení. Tento chladicí systém byl instalován v ocelárně v USA.



Obr. 32 Výsledná rychlost ochlazování a změřené teploty pro homogenní chladicí systém po šířce plechu od 0 (střed) do 75 mm (kraj plechu)

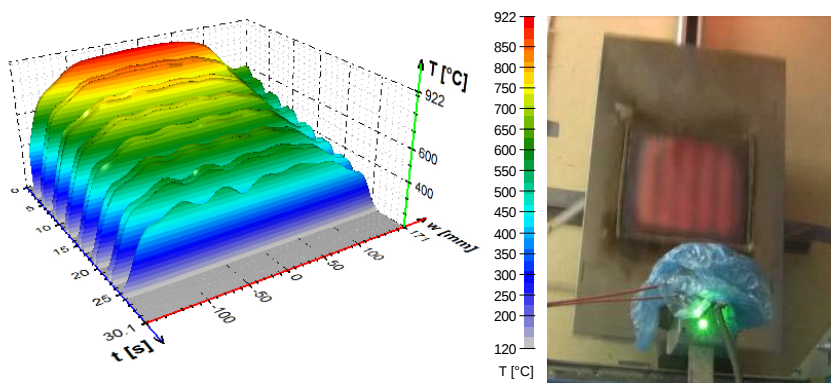
4.5 STUDIUM INTENZIFIKACE VODNÍHO CHLAZENÍ POMOCÍ PROUDĚNÍ VZDUCHU

V rámci spolupráce se společností Andritz Metals byl testován koncept kombinace vodního a vzduchového chlazení, přičemž ke směsi vzduchu a vody dochází až v oblasti mezi experimentální deskou a tryskami. Schéma chladicí sekce je zobrazeno na Obr. 33.

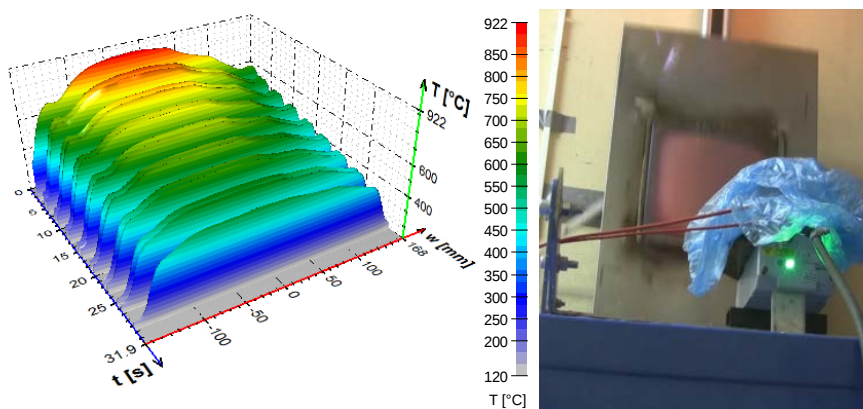


Obr. 33 Schéma rozložení vzduchových (modré kruhy) a vodních trysek (bílé kruhy) s kuželovým paprskem společně s pozicí termočlánků (vlevo, čelní pohled) a schéma rozložení trysek z bočního pohledu (vpravo)

Pro tyto experimenty byl použit vertikální stand (Obr. 13 napravo). Byla provedená rozsáhlá studie chlazení kombinující různé tlaky vody (0 – 15 bar) a vzduchu (0 – 16,5 kPa). Nejprve byly provedeny testy na homogenitu chlazení s infračerveným řádkovým scannerem Raytek RAYTMP150MT, který byl umístěn mezi pecí a chladicí sekci tak, aby zaznamenával teploty po šířce plechu. Na Obr. 34 a Obr. 35 jsou ukázky homogenního chlazení (chlazení pouze vzduchem) a nehomogenního chlazení (tlak vody 5 bar a tlak vzduchu 3 kPa).

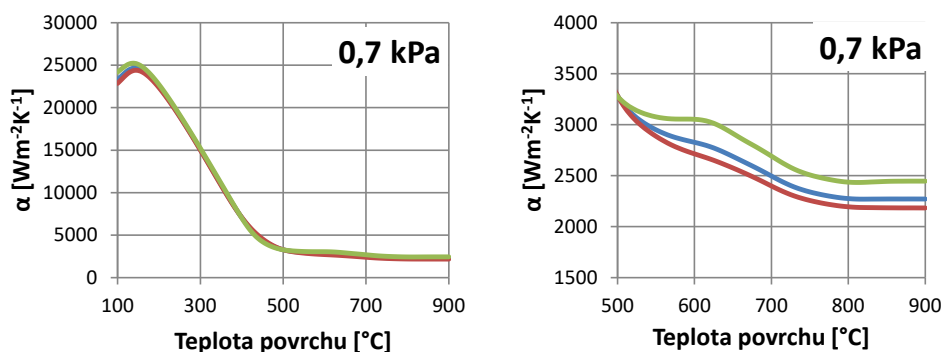


Obr. 34 Ukázka záznamu z řádkového scanneru pro střed plechu – nehomogenní chlazení T – teplota povrchu, t – čas a w je šířka plechu, tlak vody 5 bar a tlak vzduchu 3 kPa

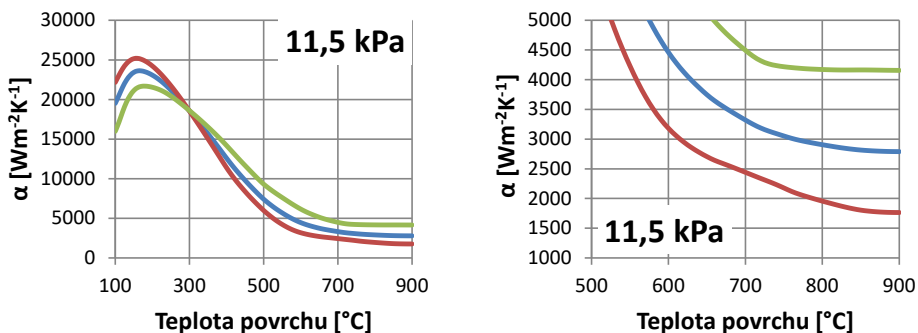


Obr. 35 Ukázka záznamu z řádkového scanneru pro střed plechu – homogenní chlazení, chlazení pouze vzduchem

Dále byly provedeny teplé testy s termočlánky přivařenými na zadní straně plechu. Termočlánky byly umístěny v pozicích pod tryskami (T3, T6 a T9) a v pozicích mezi tryskami (T1, T2, T4, T5, T8, T10, T11). Pozice termočlánků je uvedena na schématu v Obr. 33 (vlevo). Výsledky těchto experimentů ukázaly, že se zvyšujícím se tlakem vzduchu se zvyšuje nehomogenita chlazení (Obr. 36 a Obr. 37). Zelené křivky reprezentují oblast pod tryskami (průměr z termočlánků pod tryskami) a červené křivky reprezentují oblast mezi tryskami (průměr z termočlánků v oblasti mezi tryskami).

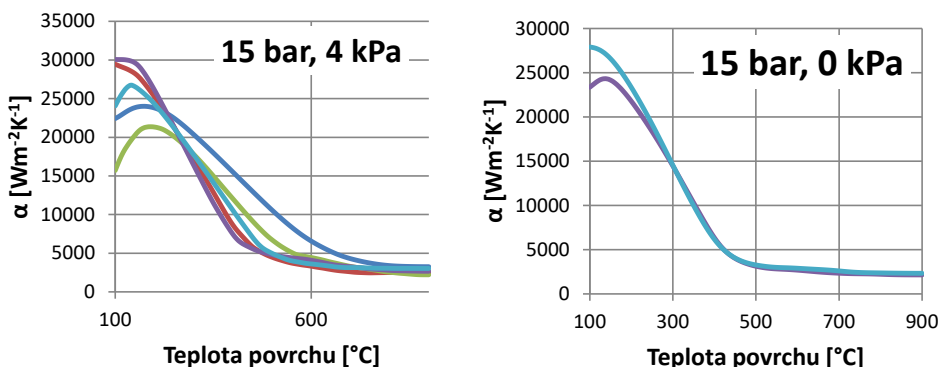


Obr. 36 Průměrný součinitel přestupu tepla pro kombinaci tlaku vody 15 bar a vzduchu 0.7 kPa, vysokoteplotní oblast (vpravo)



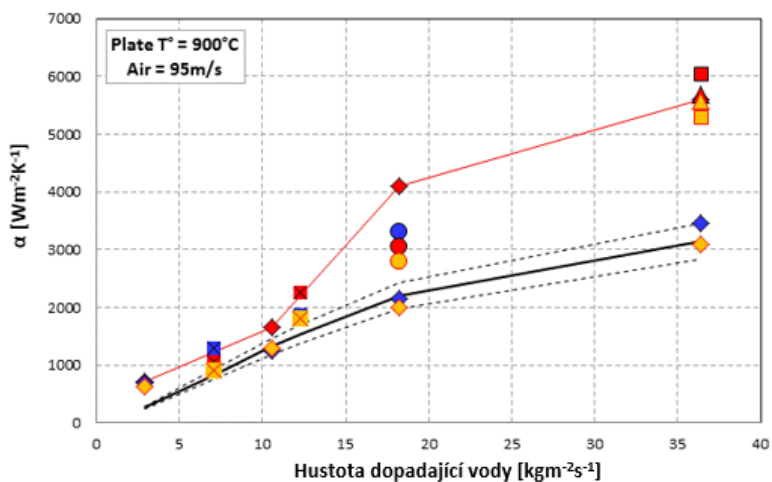
Obr. 37 Průměrný součinitel přestupu tepla pro kombinaci tlaku vody 15 bar a vzduchu 11,5 kPa, vysokoteplotní oblast (vpravo)

Při porovnání průměrných hodnot intenzit chlazení (modré křivky) byly zjištěny nelogičnosti v součinitelích přestupu tepla. V případě konstantního tlaku vzduchu se se zvyšujícím se tlakem vody zvyšoval součinitel přestupu tepla. Ovšem v případě konstantního tlaku vody a zvyšujícího se tlaku vzduchu už není zřejmá tendence růstu součinitele přestupu tepla. Z tohoto důvodu byly provedeny testy opakovatelnosti, jež potvrdily nevyhovující opakovatelnost pro experimenty se vzduchem. Příklady opakovatelnosti je uveden na Obr. 38.



Obr. 38 Opakovatelnost měření pro experimenty s vypnutým a zapnutým vzduchem

Na základě těchto skutečností provedli ve společnosti Andritz porovnání průměrných součinitelů přestupu tepla v oblastech pod a mezi tryskami s výpočtovým modelem součinitele přestupu tepla podle Wendelstorfova [28]. Porovnáním trendů bylo zjištěno, že změřené součinitele přestupu tepla pro vodní chlazené jsou v souladu s modelem. Ovšem při chlazení vodou a vzduchem kopírují změřené součinitele přestupu tepla trend s modelem, avšak jsou lehce vyšší až do hustoty dopadající vody $12 \text{ Kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$. Od této hodnoty dochází k prudkému nárůstu součinitele přestupu tepla a chlazení je potencionálně nestabilní Obr. 39. Černá křivka symbolizuje hodnoty vypočtené pomocí modelu. Červená křivka je pro chlazení se vzduchem v oblasti pod tryskami. Modré značky jsou pro chlazení pouze vodou a žluté značky jsou pro chlazení s vodou a vzduchem v oblasti mezi tryskami.



Obr. 39 Porovnání změřených hodnot s Wendelstorffovým modelem predikce součinitele přestupu tepla (. Černá křivka symbolizuje hodnoty vypočtené pomocí modelu. Červená křivka je pro chlazení se vzduchem v oblasti pod tryskami. Modré značky jsou pro chlazení pouze vodou a žluté značky jsou pro chlazení s vodou a vzduchem v oblasti mezi tryskami.)

5 ZÁVĚR

Vodní chlazení v procesech výroby ocelových produktů je obtížné vzhledem k různým stádiím varu na povrchu. Střídají se zde tři režimy – blánový, přechodový a nukleační var. V těchto třech režimech dochází k zásadním změnám intenzity chlazení. V oblasti blánového varu je intenzita chlazení nejnížší, protože horký povrch je od chladicí vody izolován parní vrstvou. V okamžiku, kdy horký povrch dosáhne Leidenfrostovy teploty, dochází k rapidnímu nárustu intenzity chlazení, přechodovému varu. Třetí fází je nukleační var, který nastává po dosažení kritické hodnoty tepelného toku. Z pohledu kontrolovatelnosti chlazení vodou jsou nejdůležitějšími parametry: velikost součinitele přestupu tepla a Leidenfrostova teplota.

V habilitační práci jsou objasněny vlivy některých parametrů na velikost součinitele přestupu tepla a Leidenfrostovy teploty. Jako hlavní dva parametry jsou logicky uvažovány: množství dopadající vody na povrch a impaktní tlak. Obecně platí, že čím více vody na povrch dopadá, tím vyšší je intenzita chlazení. Ovšem tato závislost není lineární a chlazení dosahuje saturace. Navíc dalším důležitým parametrem je Leidenfrostova teplota, která je nepochybně ovlivněna dalšími parametry. Například impaktní tlak je velmi důležitý. Jako příklad můžeme uvést chlazení tryskami o různých velikostech, kdy průtok vody bude stejný, ale tlak bude odlišný. Vyšší tlak bude zvyšovat jak součinitel přestupu tepla, tak i Leidenfrostovu teplotu. Korelační vztahy, predikující průběh součinitele přestupu tepla, které jsou závislé pouze na množství dopadající vody nejsou dostatečně přesné pro sprchové chlazení.

Dalším parametrem majícím bezesporu vliv na intenzitu chlazení jsou oxidické vrstvy. Ukázalo se, že oxidické vrstvy (ačkoliv jsou to izolanty) mohou paradoxně zvyšovat intenzitu chlazení a posouvat Leidenfrostovu teplotu. V rámci studie přenositelnosti získaných dat z laboratorních měření do praxe se ukázalo, že data změřená pomocí austenitické experimentální desky jsou velmi dobře přenositelná i pro ostatní železné materiály až na jeden. Tím byla křemíková ocel, která obsahuje na povrchu oxidy křemíku, jež není snadné odstranit pomocí vodního paprsku. Oxidické křemíkové vrstvy na experimentálních deskách způsobily dvojnásobný nárůst součinitele přestupu tepla oproti ostatním materiálům.

Dalším parametrem, který má zásadní vliv na Leidenfrostovu teplotu je teplota vody. Obecně by se dalo říct, že s rostoucí teplotou vody klesá Leidenfrostova teplota. Ovšem je to silně závislé na dopadové energii a velikost kapek. Experimenty ukázaly, že Leidenfrostova teplota byla konstantní pro teploty vody 20 – 40°C a ke změně došlo až při teplotách 50 - 60°C a 70 – 80°C. Ovšem při zvýšení průtoku vody (ostatní parametry experimentu byly identické) došlo k posunu Leidenfrostovy teploty i pro vodu o teplotě 20 a 40°C. Toto zjištění vysvětluje některé problémy s provozním chlazením v létě a v zimě.

V rámci evropského RFCS projektu MANCOOL byl studován vliv různých druhů olejů a aditiv na přenos tepla. Cílem bylo zvýšit chladicí intenzitu pracovních válců při procesu válcování za studena, které jsou chlazeny emulzemi. Byly testovány různé druhy emulzí na bázi vepřového tuku, kokosového, palmového oleje apod. Ukázalo se, že i velmi malá koncentrace oleje ve vodě (0,1%) snižuje intenzitu chlazení oproti čisté vodě. Se zvyšující se koncentrací dochází ke snižování součinitele přestupu tepla. Dále byl testován vliv aditiva Bonderite L-AD EP 5501, který by měl zvyšovat intenzitu chlazení. Výsledkem bylo sice zvýšení intenzity chlazení pro emulzi, avšak ta byla stále nižší než pro vodu. Intenzitu chlazení se podařilo zvýšit pomocí optimalizace chlazení pracovního válce, kdy bylo navrženo použití jiných trysek a jejich rozložení se zachováním stejného tlaku. Při této optimalizaci došlo k úspoře vody o 34%. Ovšem ze simulací bylo zjištěno, že při aplikaci optimalizovaného chlazení by došlo ke snížení teploty válce pouze o 6°C. Výraznějším benefitem by bylo snížit teplotu chladiwa. Bylo tedy navrženo separovat chlazení od lubrikace, a to pomocí vodního nože. Jako chladiwo by pak byla použita pouze voda, která by při teplotě 20°C snížila teplotu válce o 34°C.

V oblasti tepelného zpracování se autor podílel na vývoji chladicích systémů pro tepelné zpracování H-profilů, trubek a plechů. V rámci spolupráce s Třineckými železárnami byl vyvinut chladicí systém na tepelné zpracování trub. V tomto projektu (TRIO) se podařilo postavit prototyp chladicího zařízení v Třineckých železárnách. Toto zařízení umožnilo zvýšit tvrdost materiálu o 50 – 100%. Po popuštění byla dosažena homogenita tvrdosti po celém profilu trubky s maximálním rozdílem 3 – 5 HRC. Dalším projektem byl vývoj chladicího systému pro tepelné zpracování H-profilu. Cílem bylo zvýšit mez kluzu u materiálu S355J2. Tohoto cíle bylo dosaženo pomocí tepelného zpracování, kdy nejmenší mez kluzu po tloušťce materiálu byla 400 MPa. Dále byly provedeny zkoušky vrubové houževnatosti při předepsané teplotě -20°C. Tyto zkoušky prokázaly trojnásobné zvýšení nárazové práce pro tepelně zpracovaný materiál.

V posledním uváděném případě byl prováděn rozsáhlý výzkum pro dodavatele chladicích sekcí Fives Stein ve Francii. V rámci této spolupráce byly vyvinuty chladicí linky tenkých plechů včetně vodních nožů, které slouží k odstranění stékající vody z povrchu vertikálně pohybujících se plechů. V rámci této spolupráce byla vyvinuta chladicí sekce s rychlostí chlazení převyšující 1000 °Cs⁻¹. Tento systém byl v současné době instalován v USA. Fives také na základě simulací používajících naše okrajové podmínky instaloval chladicí sekci nerezových plechů v Číně. Verifikací správnosti simulací bylo porovnání predikovaných a skutečných průtoků vody, které byly potřebné pro zchlazení válcovaného sortimentu. Nejvyšší rozdíl mezi predikovaným a skutečným průtokem byl 15%.

Další spoluprací se společností Fives Stein byl výzkum v oblasti tepelného zpracování plechů pomocí vodo-vzdušných trysek. Laboratorní testy ukázaly výbornou homogenitu chlazení pro všechny kombinace tlaků vody a vzduchu. Bylo zjištěno, že se zvyšujícím se tlakem vody roste i Leidenfrostova teplota. Ovšem v případě zvyšujícího se pouze tlaku vzduchu je součinitel přestupu tepla srovnatelný pro tlaky vzduchu nižší než tlak vody. Ve chvíli, kdy tlak vzduchu je roven nebo vyšší než tlak vody, dochází ke snížení Leidenfrostovy teploty. Posledním uvedeným výzkumem v habilitační práci je zaměřen na intenzifikaci chlazení pomocí vzduchu, avšak ke smíšení vzduchu s vodou dochází až v oblasti mezi tryskou a povrchem plechu. Tyto experimenty ukázaly, že se zvyšujícím se tlakem vzduchu roste intenzita chlazení, avšak homogenita chlazení se zhoršuje. Navíc bylo experimentálně zjištěno, že některé experimenty chlazení s vodo-vzdušným chlazením nejsou opakovatelné. Pomocí porovnání predikcí součinitele přestupu tepla získaných dle Wendelstorfova modelu a změřených dat byla zjištěna hranice hustoty dopadající vody 12 Kg m⁻² s⁻¹, kdy při vodo-vzdušném chlazení dochází k nárustu součinitele přestupu tepla a chlazení je potenciálně nestabilní.

Předložená habilitační práce autora je založena na příkladech řešených projektů jak dotačního, tak i aplikovaného výzkumu v oblasti přenosu tepla. Autor ukázal své odborné znalosti, jež zahrnují nalezení postupu řešení konkrétního problému, provádění a přípravu experimentální činnosti, vyhodnocování a analýzu naměřených dat. Většina výsledků uvedených v habilitační práci byla publikována v člancích či na mezinárodních konferencích.

LITERATURA

- [1] Kenneth B.; Moravec R.; Horsky J.; Guzej M., The Effect of Steel Composition on the Interfacial Heat Transfer Coefficients for the Secondary Cooling Zones in a Continuous Caster. In *AISTech 2014 Iron and Steel Technology Conference. AIST Association for Iron & Steel Technology*. Indianapolis: AISTech 2014, 2014. p. 2873-2880. ISBN: 9781935117421. ISSN: 1551-6997.
- [2] Xu F., Gadala M. S., Heat Transfer Behaviour in the Impingement Zone under Circular Water Jet, *International Journal of Heat and Mass transfer*, 2006, vol. 49, pp. 3785–3799, ISSN: 0017-9310
- [3] Hnizdil M., Vývoj Metod In-line Tepelného Zpracování. Brno, 2012. Disertační práce. Vysoké Učení Technické v Brně. Vedoucí práce prof. Ing. Miroslav Raudenský, CSc.
- [4] Raudensky M., Hnizdil M., Lee S., Kim S., Hwang J., Influence of Water Temperature on Cooling Intensity of Mist Nozzles in Continuous Casting, *Materiali in tehnologije*, 2012, vol. 46, Issue: 3, pp. 311-315, ISSN: 1580-2949
- [5] Yao S.C., Cox T.L., A General Heat Transfer Correlation for Impacting Water Sprays on High-Temperature Surfaces, *Experimental Heat Transfer*, 2002, vol. 15, Issue 4, pp. 207 – 219, DOI10.1080/08916150290082649
- [6] Al-Ahmadi H.M., Yao S.C., Spray Cooling of High Temperature Metals Using High Mass Flux Industrial Nozzles, *Experimental Heat Transfer*, 2008, vol. 21, Issue 1, pp. 38 – 54, DOI10.1080/08916150701647827
- [7] Hnizdil M., Kominek J., Lee T.W. Raudensky M., Carnogurska M., Chabicovsky M., Prediction of Leidenfrost Temperature in Spray Cooling for Continuous Casting and Heat Treatment Processes, *Metals*, 2020, vol. 10, issue 11, DOI: 10.3390/met10111551
- [8] Ravikumar V., Jha M., Haldar K., Pal K., Chakraborty S., Surfactant-based Cu-water nanofluid spray for heat transfer enhancement of high temperature steel surface, *Journal of heat transfer*, 2015; vol. 137, pp. 1-8
- [9] Sarkar I., Behera K., Jha M., Pal K., Chakraborty S., Effect of polymer additive on the cooling rate of a hot steel plate by using water jet. *Experimental thermal and fluid science*, 2016; vol. 70, pp. 105-114
- [10] Ravikumar V., Jha M., Sarkar I., Mohapatra S., Pal K., Chakraborty S., Achievement of ultrafast cooling rate in a hot steel plate by air-atomized spray with different surfactant additives. *Experimental thermal and fluid science*. 2013, vol. 50, pp. 79-89
- [11] Ravikumar V., Jha M., Sarkar I., Pal K., Chakraborty S., Mixed-surfactant additives for enhancement of air-atomized spray cooling of a hot steel plate. *Experimental thermal and fluid science*, 2014, vol. 55, pp. 210-220
- [12] Ravikumar V., Jha M., Sarkar I., Pal K., Chakraborty S., Enhancement of heat transfer rate in air-atomized spray cooling of a hot steel plate by using an aqueous solution of non-ionic surfactant and ethanol. *Applied thermal engineering*. 2014, vol. 64, pp. 64-75

- [13] Cheng W., Xie B., Han F., Chen H., An experimental investigation of heat transfer enhancement by addition of high-alcohol surfactant (HAS) and dissolving salt additive (DSA) in spray cooling. *Experimental thermal and fluid Science*. 2013; vol. 45, pp. 198-202
- [14] Hnizdil M., Chabicoovsky M., Jacobs L., Vervaet B., Cooling efficiency of various emulsions during cold rolling, In 11th International Rolling Conference - IRC 2019, São Paulo, 2019 pp. vol. 11, pp. 907 – 914, DOI 10.5151/9785-9785-32481
- [15] Ribicky R., Mudawar I., Single-phase and two-phase cooling characteristics of upward-facing and downward-facing sprays, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2006, vol. 49, issue 1 – 2, pp. 5 – 16, DOI10.1016/j.ijheatmasstransfer.2005.07.040
- [16] Lechler, Main catalogue General Industry | Precision Nozzles and Accessories, 2012
- [17] Horsky J., Hnizdil M., Chabicoovsky M., Kotrbacek P., In-line heat treatment of flat products. In European Conference on Heat Treatment, 2016, Prague, Czech republic
- [18] Hnizdil M., Chabicoovsky M., Experimental study of in-line heat treatment of 1.0577 structural steel. In 17th International Conference on Metal Forming, 2018, Toyohashi, Japan, Vol. 15, pp. 1596 – 1603, DOI: 10.1016/j.promfg.2018.07.305
- [19] Stransky M., Brozova T., Raudensky M., Hnizdil M., Turon R., Effect of Various Spray Cooling Configurations on Hardness profile of tubes, In 24th International conference on metallurgy and materials, 2015, Brno, Czech republic, pp. 880 – 885
- [20] Turon R., Squerzi M., Hnizdi M., Chabicoovsky M., Simecek P., Kreisinger M., Development of the tube quenching prototype unit. *Acta Metallurgica Slovaca*, 2018, vol. 24, Issue 3, pp. 251-258, DOI: 10.12776/ams.v24i3.1163
- [21] Horsky J., Kotrbacek P., In-Line Heat Treatment of Long Products, *23rd International Conference on Metallurgy and Materials*, 2014, , Brno, Czech republic, pp. 253-258.
- [22] ITA, Ltd. QTSteel 3.4.3 - Quench and Tempering of Steels. Users Guide, 2016. 40 pages
- [23] Chabicoovsky M., Hnizdil M., Tseng A. A., Raudensky M., Effects of oxide layer on Leidenfrost temperature during spray cooling of steel at high temperatures. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2015, vol. 88, pp. 236-246, DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2015.04.067
- [24] CHABIČOVSKÝ, M. Faktory ovlivňující sprchové chlazení za vysokých teplot. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2015. 105 s. Vedoucí dizertační práce prof. Ing. Miroslav Raudenský, CSc.
- [25] Hnizdil M., Raudensky M., Influence of water temperature on the cooling intensity during continuous casting and hot rolling, In 21st International Conference on Metallurgy and Materials, 2012, Brno, Czech republic, pp. 129-134

- [26] Hnizdil M., Chabicoovsky M., Raudensky M., Magadoux E., Code F., Spray cooling unit for heat treatment of stainless steel sheets, In International Conference on Materials Science and Engineering Technology, 2014, Shanghai, China, vol. 936, pp. 1720-1724
- [27] Hnizdil M., Chabicoovsky M., Raudensky M., Influence of the Impact Angle and Pressure on the Spray Cooling of Vertically Moving Hot Steel Surfaces. *Materiali in Tehnologije*, 2015, vol. 49, issue 3, pp. 333-336, DOI: 10.17222/mit.2013.239
- [28] Wendelstorf J., Spitzer K.-H., Wendelstorf R., Spray Water Cooling Heat Transfer at High Temperatures and Liquid Mass Fluxes. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 51, No. 19–20, pp. 4902–4910, 2008, DOI:10.1016/j.ijheatmasstransfer.2008.01.032.

ABSTRAKT

The habilitation thesis is based on examples of solved commercial projects, grants and applied research in the field of thermal processes in a steel industry mainly in continuous casting, hot rolling and heat treatment processes.

Several cooling parameters and their influence on a cooling intensity and Leidenfrost temperature were studied. Surface oxides on steel plates can enhance the cooling. Oils and additive surfactants decreases the heat transfer compared to pure water. Coolant temperature changes Leidenfrost point. Further the tube heat treatment cooling zone was designed and build in Trinecke Zeleżarny. This design was based on laboratory measurements and simulations. Tube hardness of various materials increased by 50 – 100%.

Other heat treatment cooling zone design of H-profile was based on laboratory measurements and the yield strength was improved from 355 to 400 MPa. Notch ductility increased 3 times.

Cooperation with Fives Stein and Andritz Selas companies leaded to designing thin plate cooling zones with very high cooling rates (higher than $1000^{\circ}\text{Cs}^{-1}$).

The author showed his expertise, which includes finding a solution to a specific problem, conducting and preparing experimental activities, evaluations and measured data analysis.