

**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**

**HABILITAČNÍ PRÁCE**

**Aplikovaná mechanika**

**V BRNĚ**

**2021**

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

Přenos tepla, experimentální metody, tepelné zpracování, součinitel přestupu tepla, válcování

## **KEY WORDS**

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

# OBSAH

1	ÚVOD.....	4
2	VÝZKUM V OBLASTI PLYNULÉHO ODLÉVÁNÍ OCELI .....	7
2.1	Experimentální zařízení pro simulaci chlazení při pomalých rychlostech.....	7
2.2	„Přenositelnost“ experimentálně získaných dat na austenitické desce na běžně odlévané oceli .....	9
2.3	Vliv teploty vody na intenzitu chlazení během kontinuálního odlévání .....	11
2.4	Predikce Leidenfrostovy teploty pomocí korelací.....	16
3	VÝZKUM V OBLASTI VÁLCOVÁNÍ.....	21
3.1	Experimentální zařízení pro simulaci chlazení na rotujících površích.....	21
3.2	Optimalizace chlazení pracovních válců a verifikace intenzity chlazení v průmyslových podmínkách.....	22
3.3	Optimalizace chlazení pracovních válců při válcování za studena .....	23
4	VÝZKUM V OBLASTI TEPELNÉHO ZPRACOVÁNÍ.....	36
4.1	Experimentální Zařízení pro testování prokalitelnosti .....	36
4.2	Experimentální Zařízení pro simulaci chlazení rychle pohybujících se vzorků.....	37
4.3	Zařízení pro simulaci chladicích sekcí v reálné délce .....	38
4.4	Proces vývoje chladicího zařízení pro tepelné zpracování .....	38
4.5	Vývoj Zařízení pro Tepelné zpracování trubek.....	43
4.6	Vliv oxidických vrstev na velikost součinitele přestupu tepla při tepelném zpracování... ..	49
4.7	Vliv teploty vody na intenzitu chlazení při tepelném zpracování .....	53
4.8	Vývoj chladicích systému pro tepelné zpracování horizontálně se pohybujících plechů .	54
4.9	Vývoj chladicích systému pro tepelné zpracování vertikálně se pohybujících plechů.....	59
4.10	Studium intenzifikace vodního chlazení pomocí proudění vzduchu.....	62
5	ZÁVĚR .....	69
	LITERATURA.....	71

# 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.

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. Je to možné jen při určitých tloušťkách vrstvy a při chlazení povrchů o vysokých teplotách nad Leidenfrostovou teplotou. Toto zdánlivě nelogické tvrzení říká, že i přesto, že vrstva oxidů má velmi špatnou tepelnou vodivost ve srovnání s vodivostí oceli, přesto je chlazení s touto vrstvou intenzivnější než chlazení čistého ocelového povrchu.

Podobně zajímavé výsledky ukázal výzkum sprchového chlazení s proměnnou teplotou chladicí vody. By zjištěn velmi výrazný rozdíl jak v chladicích intenzitách, tak ve velikosti Leidenfrostovy teploty, a to už při teplotních rozdílech vody o 20°C. Ukázalo se to jako faktor vysvětlující problémy s chlazením při provozu některých zařízení v zimních a letních měsících.

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.

Obecnou snahou evropských výrobců oceli, nejméně v posledních deseti letech, je konkurovat levným čínským výrobkům zvýšenou přidanou hodnotou. Číně připadá přibližně polovina světové výroby oceli. Úspora nákladů na výrobu ocelových produktů a požadavky na zvýšení jakosti se tak staly vysoce aktuální. Řešením je tedy vyspělý materiálový vývoj a ten sebou nese požadavky na navazující tepelné zpracování. V této oblasti se ale také projevují zvýšené požadavky na jakost povrchu, zejména v produkci pro automobilový průmysl. V oblasti přímého tepelného zpracování, při válcování, byly řešeny úlohy chlazení pásů válcovaných za tepla. Léta používaná technologie chlazení laminárními vodními proudy se ukázala jako nedostatečně říditelná pro dosažení přesných režimů chlazení na výběhovém valníku. Proto byly studovány způsoby kombinovaného chlazení s využitím vodních trysek.

Autor habilitační práce se podílel také na vývoji vodních nožů, což je termín používaný pro sprchové systémy bránící volnému proudění kapaliny po chlazeném povrchu. Základní úlohou je nalezení vhodné interakce dynamického vodního paprsku s odstraňovanou vrstvou kapaliny. Při tomto procesu je nutné studovat současně i otázku přenosu tepla v oblasti interakce. V principu se jedná o dva rozdílné studované případy. Prvním případem je chlazení horizontálně orientovaných povrchů při in-line chlazení vyválcovaných pásů. A druhý případ se týká svislých povrchů, které procházejí intenzivním chlazením, a množství chladicí kapaliny padá z horních chladicích sekcí dolů a brání tak efektivnímu a řízenému chlazení spodních sekcí. První případ byl řešen především pro firmu Posco

v Jižní Koreji. Cílem bylo odstranit z povrchu pásu o teplotě kolem 900 °C vrstvu vody, která se tam pohybuje (plave) na parním polštáři. Díky chaotickému pohybu vodní vrstvy na povrchu docházelo k lokálním teplotním nehomogenitám, které pak způsobovaly nehomogenity v materiálových vlastnostech. Při řešení bylo nutno uvažovat se značnou hybností unášené vrstvy a partner vyžadoval pro numerické modely informace o přestupu tepla v oblasti působení vodního nože. Zajímavé výsledky nehomogenit chlazení byly nalezeny i v případě výzkumu pro partnera z Itálie (Danieli). Zde byly popsány nehomogenity chlazení způsobeny zejména bočními proudy vody, které mají za cíl odstranit nežádoucí vrstvu vodu z povrchu tlustého plechu. V obou případech se jedná o výsledky, které průmyslový partner považuje za citlivé a nesouhlasí s jejich veřejným publikováním.

Jedním z projektů pro Francouzskou firmu Fives byl návrh vodních nožů pro linku kalení tenkých pásů. Jedná se o zařízení, kde se v peci ohřívá svitek pásu o délce až dva kilometry a pás se pak odvíjí a prochází svisle chladicími sekce s cílem řízeného chlazení. Z horních sekcí přitom padá kolem povrchu pásu chladivo. Padající chladivo není možné odclonit mechanicky, protože by docházelo z poškození povrchu pásu, který je ve většině případů určen pro automobilový průmysl. Řešení vyžadovalo nalezení vhodné geometrické konfigurace při požadavku na minimalizaci nezbytného tlaku a stanovení závislosti přenosu tepla v místě působení vodního nože na teplotě povrchu pásu.

Velmi zajímavé výzkumné a vývojové práce byly realizovány při vývoji tepelného zpracování tlustých plechů pro firmu Posco. Jednalo se o nově navrhovanou válcovací trať pro extrémní šířky plechů používaných pro stavbu lodí. Válcovna vyrábí tlusté plechy široké až 5,4 metru. Autor habilitační práce se podílel na experimentálním studiu účinků chlazení přes vodní vrstvu. Při této šířce vývalku a intenzivnímu chlazení je ve střední části plechu vrstva vody vysoká až 260 mm. Tato překvapující hodnota byla nejprve získána numerickým modelem proudění na VUT (realizoval Dr. Boháček) a pak byla experimentálně ověřena v laboratořích firmy Posco. Pro měření intenzity chlazení byly proto vyvíjeny experimentální metody, kdy dynamické chladicí proudy pronikaly přes různou tloušťku vodní vrstvy a měřený vzorek se pohyboval pod chladicími kolektory. Výsledná intenzita chlazení pak výrazně závisela na interakci vodní vrstvy s dopadajícími proudy chladiva. Jednalo se navíc o chlazení povrchu nad Leidenfrostovou teplotou, ale v místě dopadů vodních proudů docházelo lokálně k prolomení souvislé parní vrstvy a k přechodu z blánového varu k varu v přechodové oblasti pod Leidenfrostovou teplotou.

Za nejzajímavější práce je možné považovat výzkum metod chlazení tenkých ocelových plechů, kde bylo cílem dosažení průměrných rychlostí chlazení až tisíc stupňů za sekundu. Přitom bylo nutné respektovat limity v použitém tlaku chladiva i v maximálních přípustných průtocích. Tohoto výsledku se podařilo dosáhnout volbou kombinace způsobu chlazení po délce navrhované chladicí sekce. I zde se jako základní parametr v návrhu objevila Leidenfrostova teplota a její závislost na parametrech ostřiku.

Obdobně 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. Tyto úlohy byly obtížné v tom, že finální výrobci chtěli použít nové, málo legované oceli, u kterých ovšem nedokázali specifikovat požadované teplotní režimy potřebné pro dosažení požadované struktury. V těchto případech byly použity laboratorní testy s řízeným chlazením malého vzorku nového materiálu s následným metalografickým studiem a testy mechanických vlastností.

V oblasti válcování se autor habilitační práce podílel na projektech souvisejících s optimalizací chladicích systémů pracovních válců s cílem zvýšit kadenci válcování provalků a snížení provozních nákladů v podobě nižšího množství chladicí kapaliny použité při chlazení. Jako příklad, může být uveden experimentální vývoj chladicího systému pracovních válců pro US Steel v Košicích. Jednalo se o kompletní rekonstrukci válcovací tratě plechů používaných k výrobě plechů pro obalové systémy, či transformátorových plechů. Navržená chladicí sekce byla v US Steel Košice postavena a autor se podílel na ověřování intenzity chlazení provozním měřením teplot pracovních válců po válcování přímo na trati v US Steel Košice.

Další zajímavé výsledky byly získány během evropského projektu Mancool, který měl za hlavní cíl zvýšit produkci tenkých plechů při válcování za studena v TATA Steel Nizozemí. V rámci tohoto projektu byla provedena optimalizace chlazení válcovací stolice, jež by přinesla úsporu vody o 34%. Dále zde byl studován vliv různých emulzí a dodatečných přísad na intenzitu chlazení. V tomto případě se ukázalo, že zvýšení intenzity chlazení není možné dosáhnout přidáním přísad do emulzí. Hlavní benefit ke snížení teploty pracovních válců spočívá v separaci chlazení a mazání provalku tím, že namísto emulze o teplotě 50 – 60°C bude použita voda o podstatně nižší teplotě a ta bude odstraněna z povrchu válce vodním nožem.

Autor habilitační práce se také podílel experimentálním stanovování okrajových podmínek pro systémy řídicí sekundární chlazení kontinuálního odlévání oceli především pro R&D centrum společnosti Arcelormittal v USA. Jejich model řízení procesu kontinuálního odlévání oceli byl instalován ve většina provozů Arcelormittal.

Tím, že má práce autora charakter experimentálního výzkumu jsou také studovány experimentální metody. Zde se jedná vždy o komplexní problém přípravy, provedení a vyhodnocení experimentu. Cílem je jednak nalezení způsobů, jak zpřesňovat získané výsledky, tak otázka přípravy a provedení experimentů, které plně pokrývají složité geometrie, a experiment se velmi věrně blíží k reálným dějům v průmyslových měřících. Zde se autor habilitační práce podílel třináct let při práci v laboratoři na zdokonalení metodiky experimentálního výzkumu.

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.

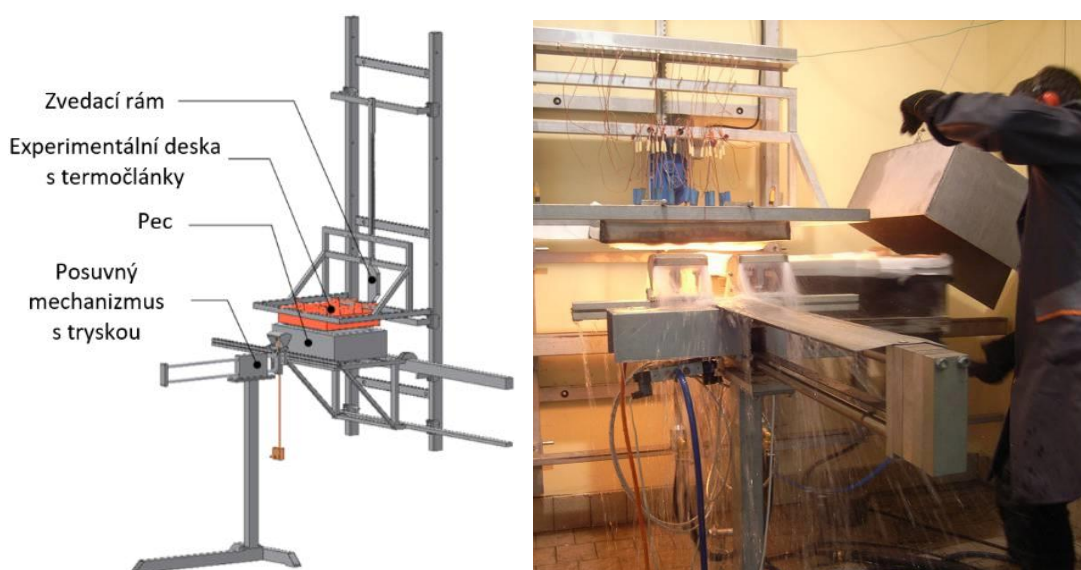
## 2 VÝZKUM V OBLASTI PLYNULÉHO ODLÉVÁNÍ OCELI



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.

### 2.1 EXPERIMENTÁLNÍ ZAŘÍZENÍ PRO SIMULACI CHLAZENÍ PŘI POMALÝCH RYCHLOSTECH

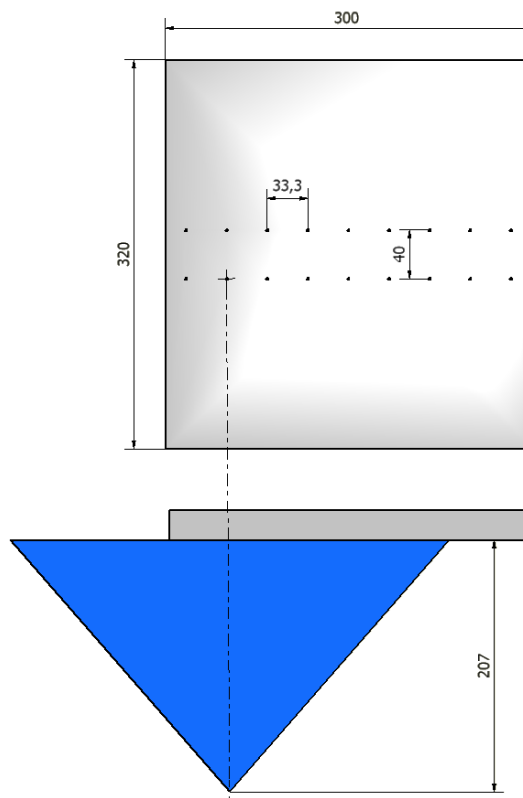
K simulaci sekundárního chlazení v laboratorních podmínkách slouží zařízení zobrazené na Obr. 1. Skládá se z elektrické pece, posuvného rámu držícího experimentální desku s teplotními senzory a posuvného mechanismu s tryskou/tryskami. Princip měření spočívá v ostříku ohřátého povrchu za pohybu, kdy jsou zaznamenávány teploty a z nich je po skončení experimentu pomocí inverzní úlohy vypočítána závislost součinitele přestupu tepla  $\alpha$  [ $\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$ ] 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.



**Obr. 1** Schéma experimentálního zařízení pro simulaci sekundárního chlazení (vlevo) a fotka z experimentu (vpravo)

Experiment začíná ohřátím experimentální desky na počáteční teplotu odpovídající provozním režimům (až 1 250 °C). Po dosažení počáteční teploty je nastaven požadovaný tlak (průtok) vody a je zapnuto záznamové zařízení. Vzorovací frekvence je v tomto případě 60 Hz. Dále je deska vyzvednuta do požadované vzdálenosti od trysky a elektrické topení je posunuto mimo chladicí prostor a zakryto. Posuvný mechanismus posouvá stříkající trysky pod deskou požadovanou rychlostí (v rozmezí 1 – 8 m min<sup>-1</sup>). Pneumaticky ovládaný deflektor slouží k odklánění vody při zpětném pohybu trysek. Voda tedy stříká na povrch desky pouze při posuvu v před. Při posuvu vzad dochází k dohřívání povrchu desky vnitřním teplem. Posuv trysek a záznam teplot je zastaven ve chvíli, kdy měřené teploty klesnou pod stanovenou hodnotu. Experimentální deska je poté mechanicky „očistěna“ a připravena na další experiment.

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. Vzdálenost mezi koncem termočlánku a povrchem desky je 2 mm. Rozteč termočlánků v každé řadě je vždy ekvidistantní. Příklad umístění termočlánků na experimentální desce s pozicí trysky je zobrazen na Obr. 2.



**Obr. 2** Příklad umístění termočlánků na experimentálním vzorku a příklad umístění trysky

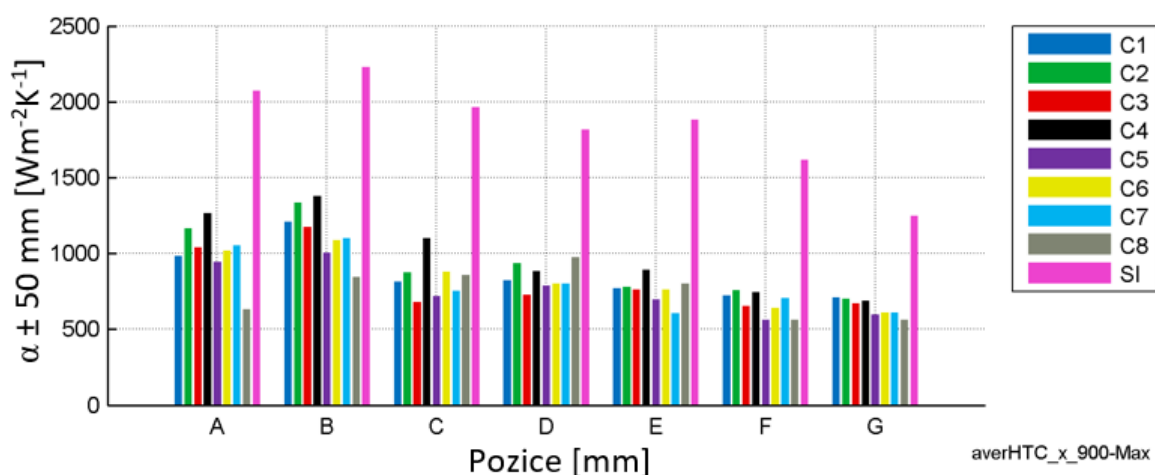


## 2.2 „PŘENOSITELNOST“ EXPERIMENTÁLNĚ ZÍSKANÝCH DAT NA AUSTENITICKÉ DESCE NA BĚŽNĚ ODLÉVANÉ OCELI

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 vodovzdušná tryska. Průměrné hodnoty na teplotním intervalu 900 – 1200°C jsou zobrazené na Obr. 3. 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].

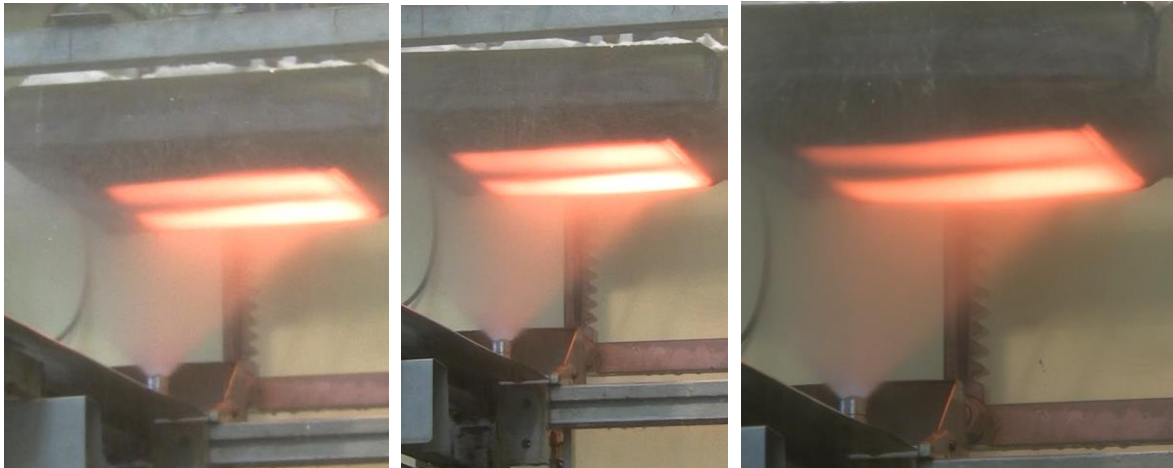
**Tab. 1** Tabulka testovaných materiálů, publikováno v [1].

Testovaný materiál	Exp.	Chemické složení [%]										
		C	Mn	Si	Ni	Mo	Cr	Nb	V	Ti	B	Al
HC05A	C1	0,06	0,8	0,05	-	-	-	0,025	-	-	-	0,04
1020	C2	0,18	0,45	-	-	-	-	-	-	-	-	0,04
1050	C3	0,51	0,75	0,1	-	-	-	-	-	-	-	0,04
1523B	C4	0,24	1,2	0,2	-	-	-	-	-	-	0,002	0,012
1080	C5	0,81	0,75	-	-	-	-	-	-	-	-	0,04
TRIP s vyšším množstvím AL	C6	0,22	1,65	0,25	-	-	-	0,02	-	-	-	1,5
Austenitická nerezová ocel	C7	0,05	1,5	-	9,2	-	19	-	-	-	-	-
ULC ocel	C8	0,003	0,25	0,03	-	-	-	-	-	0,06	-	0,06
2% Křemíková ocel	SI	0,03	0,45	2,0	-	-	-	-	-	-	-	0,2

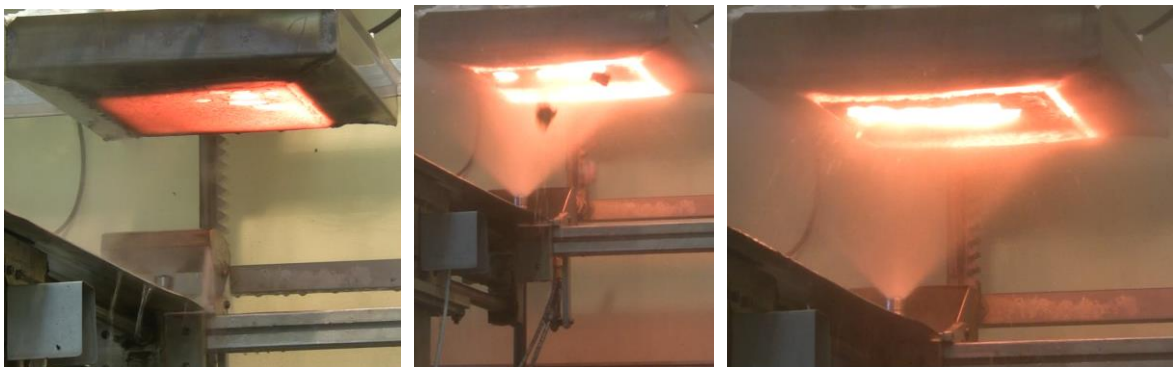


**Obr. 3** Velikost průměrného součinitele přestupu tepla pro různé pozice  $p$  - o šířce desky a teplotní interval 900 – 1200°C, publikováno v [1].

Experimenty s austenitickou a křemíkovou ocelí byly opakovány třikrát při stejném experimentálním nastavení. Porovnáním níže zobrazených obrázků z těchto experimentů (Obr. 4 a Obr. 5) je vidět 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 (Obr. 6). Z obrázků experimentů je i zřejmé, že místa s oxidickými vrstvami jsou značně studenější (na obrázcích tmavší).



**Obr. 4** Ukázka ze tří experimentů s austenitickou experimentální deskou (Au1 vlevo, Au2 uprostřed a Au3 vpravo)

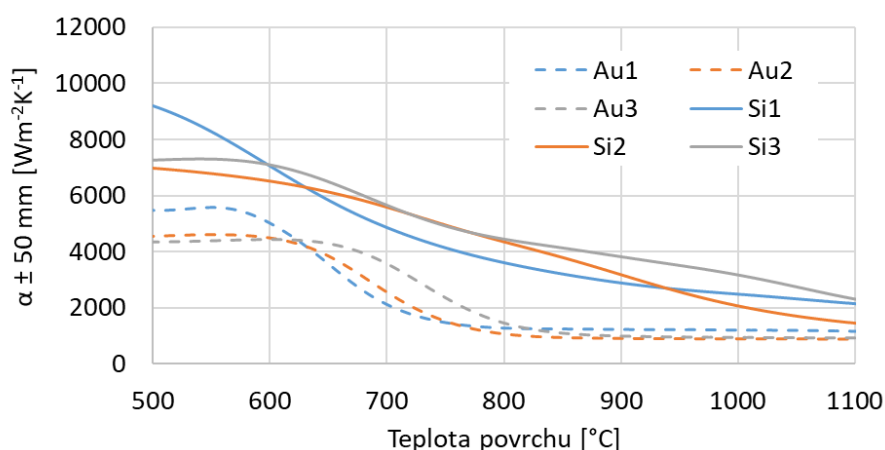


**Obr. 5** Ukázka ze tří experimentů s ocelí s vyšší obsahem křemíku (Si1 vlevo, Si2 uprostřed a Si3 vpravo)



**Obr. 6** Spodní vrstva oxidů na křemíkové oceli při třetím experimentu

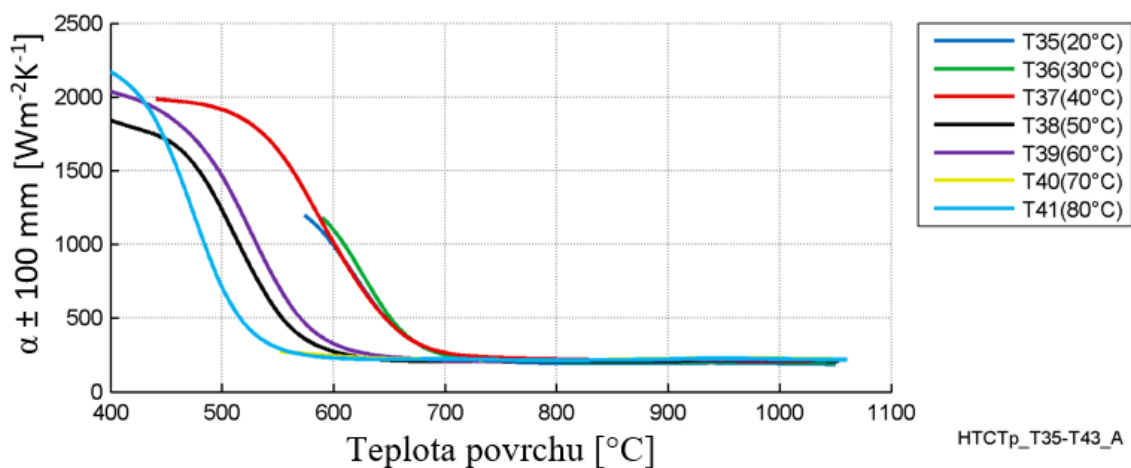
Vliv oxidických vrstev na součinitel přestupu tepla je patrný z Obr. 7. Velikost součinitele přestupu tepla je nižší pro případ chlazení austenitické oceli. Leidenfrostova teplota se pohyboval v teplotním intervalu 750 – 800°C. V případě chlazení oceli s vyšším obsahem křemíku došlo k výraznému nárůstu součinitele přestupu tepla v celém teplotním intervalu (500 – 1100°C). V tomto teplotním intervalu je režim chlazení již pod Leidenfrostovou teplotou. Vliv oxidických vrstev je podrobněji studován v kapitole 4.6.



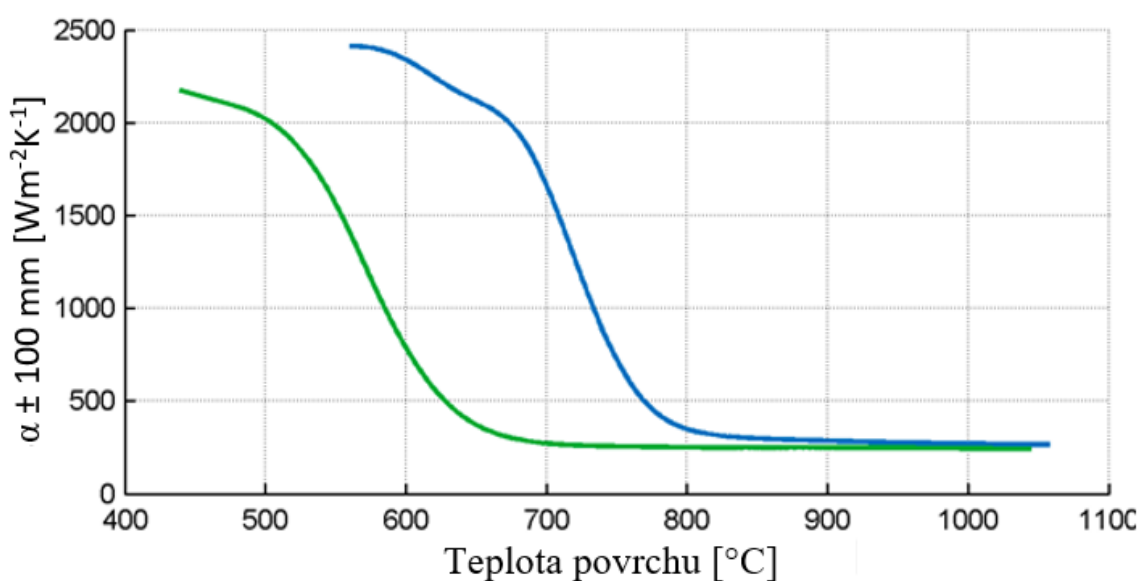
**Obr. 7** Porovnání výsledků součinitele přestupu tepla pro experimenty s austenitickou a křemíkovou ocelí

### 2.3 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. Leidenfrostova teplota byla porovnatelná pro teploty vody 20 až 40 °C, potom skokově klesla pro teploty vody 50 a 60 °C a následně pro 70 a 80 °C. Z toho vyplývá, že s rostoucí teplotou vody, Leidenfrostova teplota skokově klesá (Obr. 8). 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<sup>-1</sup> byl nalezen zásadní posun Leidenfrostovy teploty i mezi teplotami vody 20 a 40 °C (Obr. 9). Výsledky tohoto výzkumu byly publikovány v [4]. Toto zjištění pomohlo vysvětlit různého chování chladicího systému v zimním a letním období.

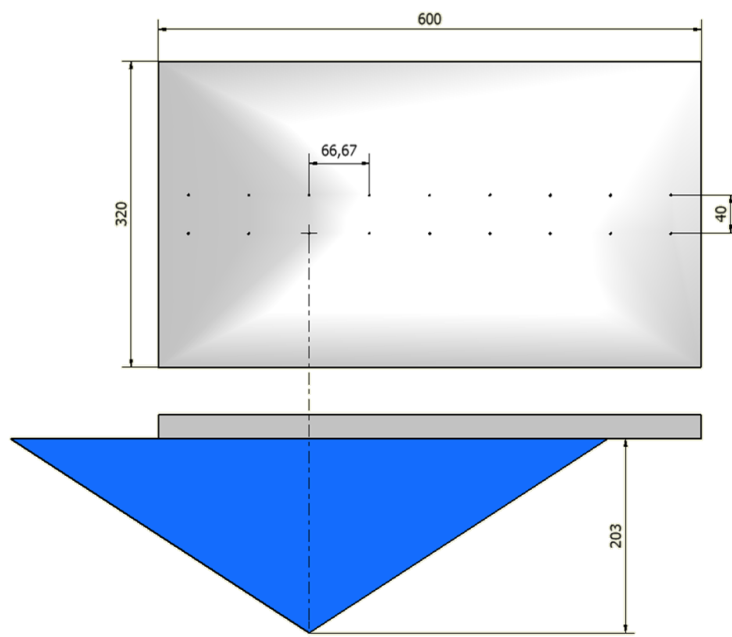


**Obr. 8** Vliv teploty vody na součinitel přestupu tepla, publikováno v [4]



**Obr. 9** Vliv teploty vody na součinitel přestupu tepla pro teplot vody 20 a 40 °C (modrá křivka pro teplotu vody 20 °C a zelená pro teplotu vody 40 °C), publikováno v [4]

Dále byly provedeny další experimenty tentokrát s jednou vodo-vzdušnou tryskou (úhel rozstříku 90°) a poté jednou vodní tryskou (úhel rozstříku 85°). Schéma nastavení experimentů je zobrazeno na Obr. 10. Byly testovány dva různé průtoky pro obě trysky. Ostatní parametry experimentu byly identické (Tab. 2).

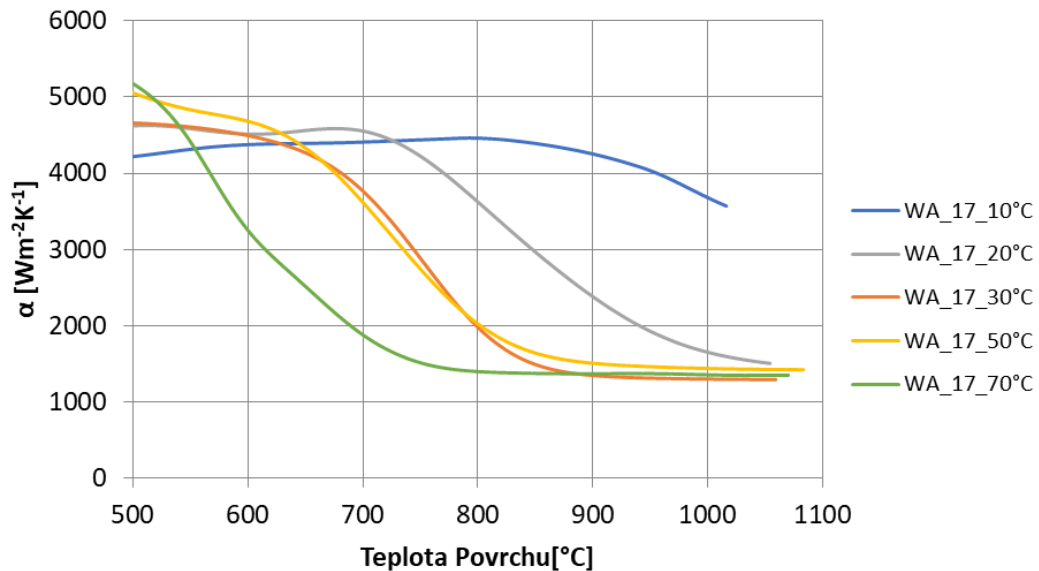


**Obr. 10** Schéma konfigurace chlazení pro navazující testy s různou teplotou vody

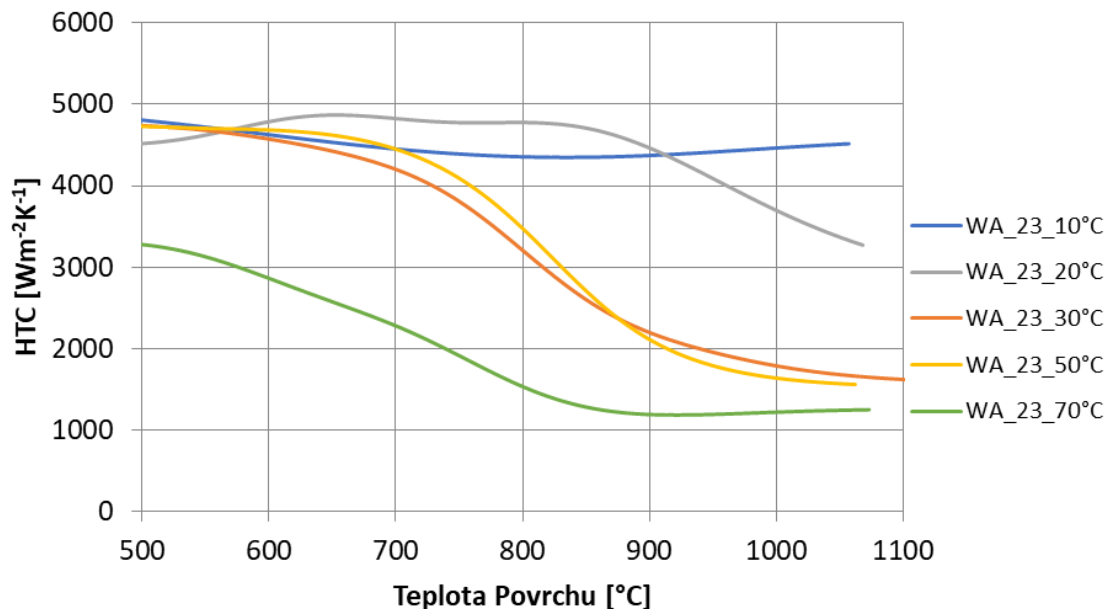
**Tab. 2** Parametry experimentů s různými teplotami vody

Název Experimentu	Teplota vody	Tryska	Průtok	Tlak vzduchu	Rychlost posuvu
	[°C]		[lmin <sup>-1</sup> ]	[bar]	[m min <sup>-1</sup> ]
WA_17_10°C	10	Vodo-vzdušná 90°	17	2	1
WA_17_20°C	20	Vodo-vzdušná 90°	17	2	1
WA_17_30°C	30	Vodo-vzdušná 90°	17	2	1
WA_17_50°C	50	Vodo-vzdušná 90°	17	2	1
WA_17_70°C	70	Vodo-vzdušná 90°	17	2	1
WA_23_10°C	10	Vodo-vzdušná 90°	23	2	1
WA_23_20°C	20	Vodo-vzdušná 90°	23	2	1
WA_23_30°C	30	Vodo-vzdušná 90°	23	2	1
WA_23_50°C	50	Vodo-vzdušná 90°	23	2	1
WA_23_70°C	70	Vodo-vzdušná 90°	23	2	1
W_4_10°C	10	Vodní 85°	4	-	1
W_4_20°C	20	Vodní 85°	4	-	1
W_4_30°C	30	Vodní 85°	4	-	1
W_4_50°C	50	Vodní 85°	4	-	1
W_4_70°C	70	Vodní 85°	4	-	1
W_8_10°C	10	Vodní 85°	8	-	1
W_8_20°C	20	Vodní 85°	8	-	1
W_8_30°C	30	Vodní 85°	8	-	1
W_8_50°C	50	Vodní 85°	8	-	1
W_8_70°C	70	Vodní 85°	8	-	1

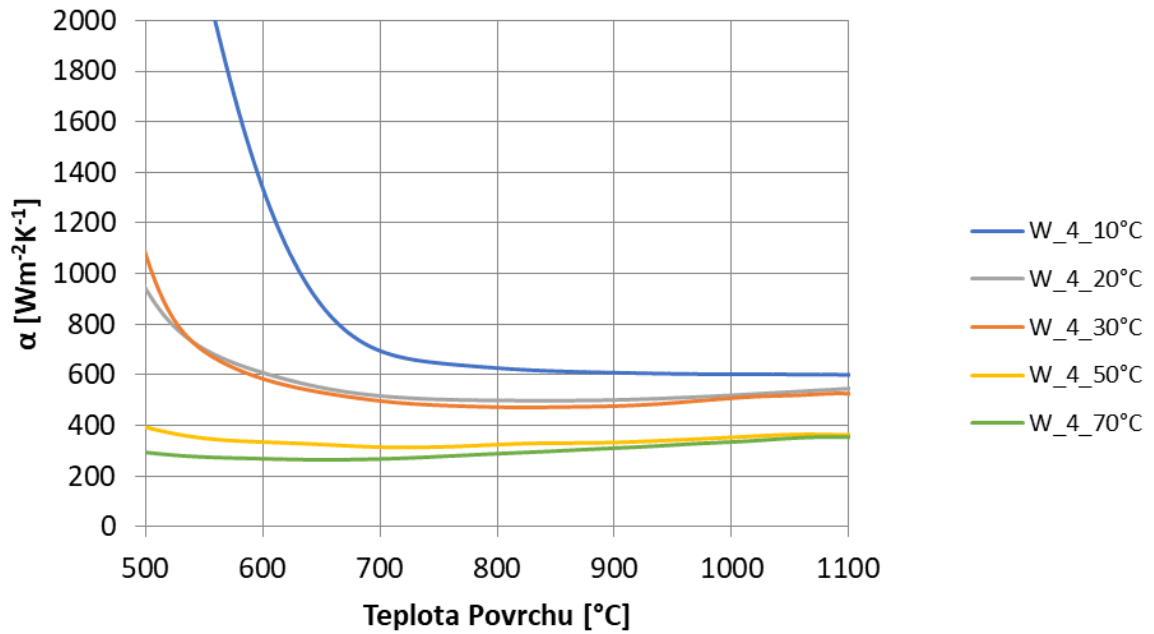
Porovnání výsledků z jednotlivých experimentů je zobrazeno na Obr. 11 - Obr. 14. Je zde vidět jasná závislost Leidenfrostovy teploty na teplotě vody a zároveň průtoku (tlaku) vody jak pro vodo-vzdušné, tak i pro vodní trysky. Velmi zajímavý výsledek byl nalezen pro vodo-vzdušnou trysku. Leidenfrostova teplota byla pro vyšší průtok porovnatelná pro teplotní intervaly 10 – 20 °C a 30 – 50. Ovšem snížením průtoku z 23 na 17 l min<sup>-1</sup> došlo k posunu Leidenfrostovy teploty pro experiment s 20° vodou do intervalu mezi 10 a 30°C. U vodní trysky byly pro oba průtoky intervaly Leidenfrostovy teploty porovnatelné (20 – 30°C a 50 – 70°C).



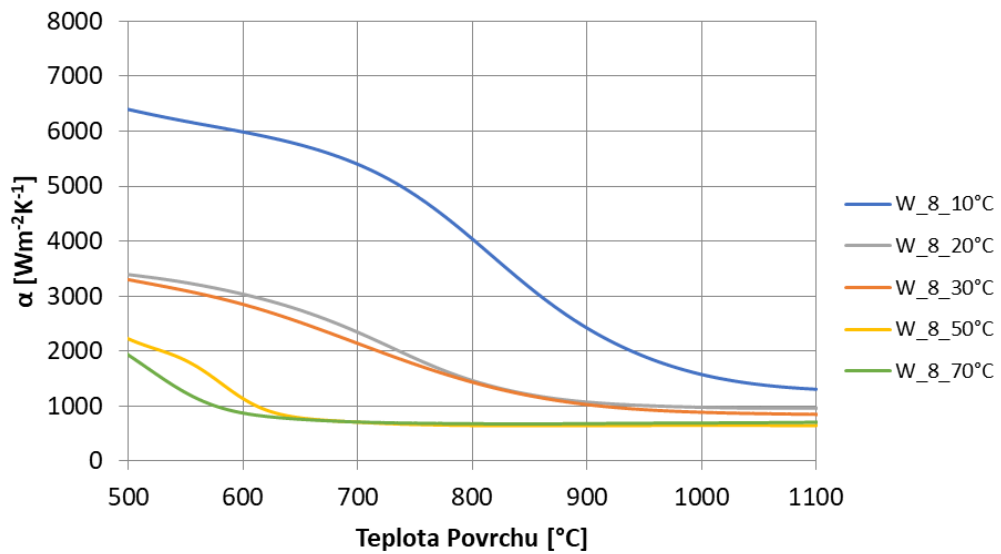
**Obr. 11** Závislost součinitele přestupu tepla na povrchové teplotě pro vodo-vzdušnou trysku s nižším průtokem a různými teplotami vody



**Obr. 12** Závislost součinitele přestupu tepla na povrchové teplotě pro vodo-vzdušnou trysku s vyšším průtokem a různými teplotami vody



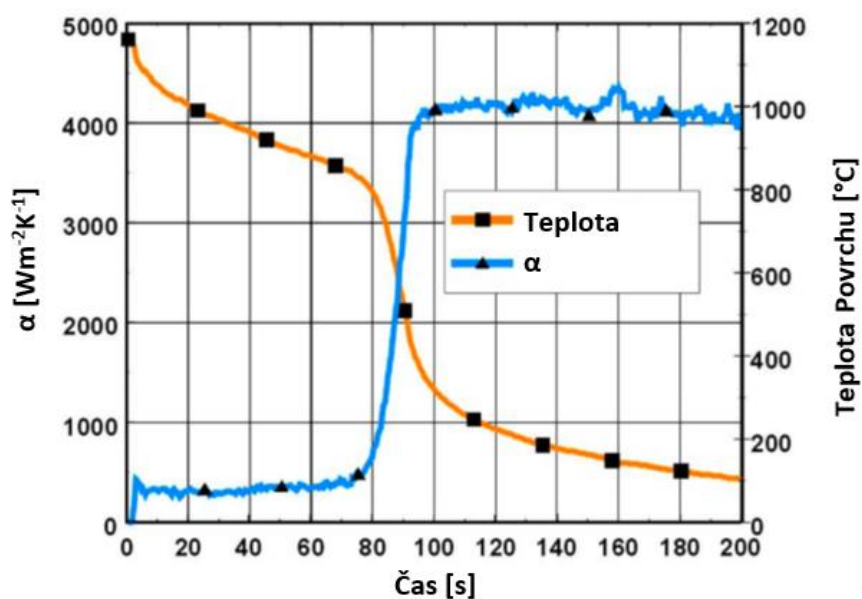
**Obr. 13** Závislost součinitele přestupu tepla na povrchové teplotě pro vodní trysku s nižším průtokem a různými teplotami vody



**Obr. 14** Závislost součinitele přestupu tepla na povrchové teplotě pro vodní trysku s vyšším průtokem a různými teplotami vody

## 2.4 PREDIKCE LEIDENFROSTOVY TEPLoty POMOCÍ KORELACÍ

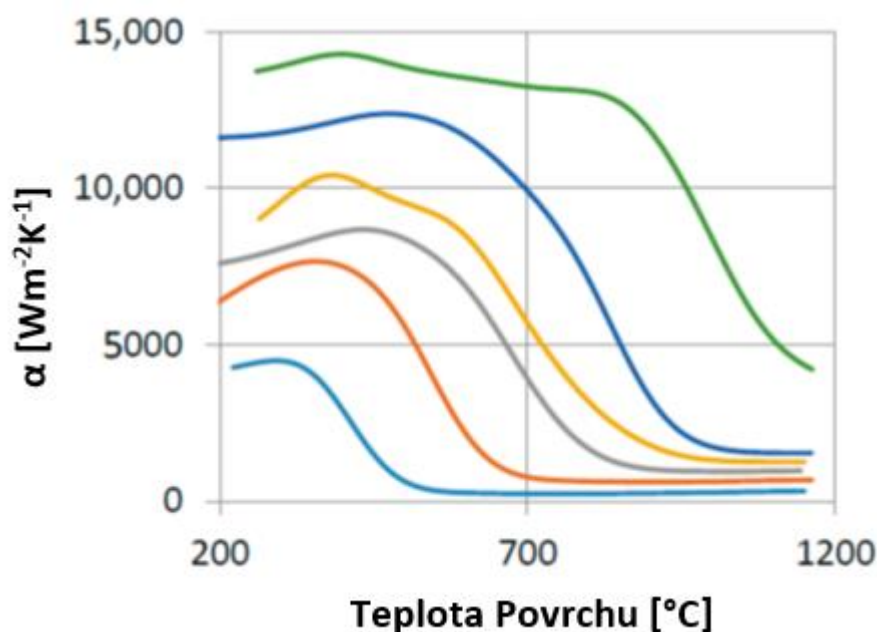
Leidenfrostova teplota je mnohdy chápána ve smyslu minima tepelného toku při blánovém varu. Po dosažení tohoto bodu dochází k proražení parní vrstvy a rapidnímu nárůstu tepelného toku. Ovšem mnohdy není jednoduché z experimentálních dat automaticky vyčíst minimum tepelného toku [5]. Během následujících korelací byla použita identifikace Leidenfrostovy teploty ze záznamu teploty na čase, tak jak je navrženo v [6]. Jedná se o teplotu, kde dochází k rapidnímu poklesu teploty, nárůstu rychlosti chlazení. Příklad takového určení je zobrazen na příkladu teplotního záznamu se součinitelem přestupu tepla (Obr. 15). Teplota povrchu velmi rychle klesá v čase 78 s. Ve stejném čase dochází k rapidní změně součinitele přestupu tepla z hodnot okolo  $400 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$  na hodnotu vyšší než  $4\,000 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$ .



**Obr. 15** Příklad typického záznamu teploty a součinitele přestupu tepla. publikováno v [7]

Příklad ukázky Leidenfrostovy teploty a jejího vývoje pro vodo-vzdušnou trysku je zobrazen na Obr. 16. Jediným proměnným parametrem byl průtok vody, kde u světle modré křivky byl nejnižší a u zelené nejvyšší. Leidenfrostova teplota se mění v rozmezí mezi  $500 \text{ °C}$  a více než  $1\,200 \text{ °C}$ . Zároveň se se zvyšujícím průtokem zvyšuje i velikost součinitele přestupu tepla.





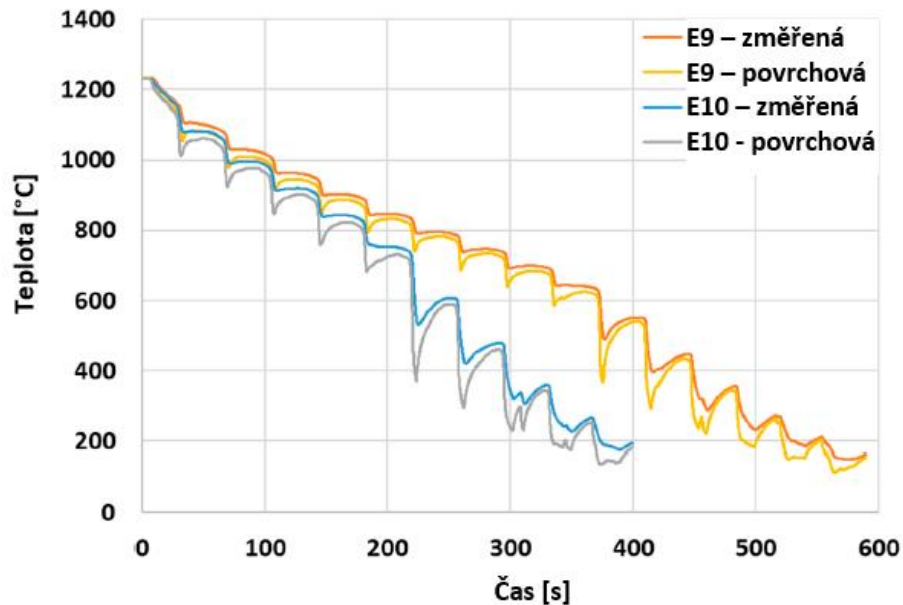
**Obr. 16** Příklad rozdílné velikosti součinitele přestupu tepla a Leidenfrostovy teploty pro různé průtoky, publikováno v [7]

Z výše uvedených výsledků vyplývá, že Leidenfrostova teplota musí být studována i v procesech kontinuálního odlévání oceli. Z tohoto důvodu jsme se ve spolupráci s Arizona State University snažili o predikci Leidenfrostovy teploty pomocí korelací. Bylo vybráno 8 vodo-vzdušných a 2 vodní trysky od renomovaných výrobců. Experimentální zařízení pro simulaci chlazení pomalu se pohybujících povrchů (kapitola 2.1) bylo použito pro tyto testy. Experimentální nastavení je specifikované v Tab. 3.

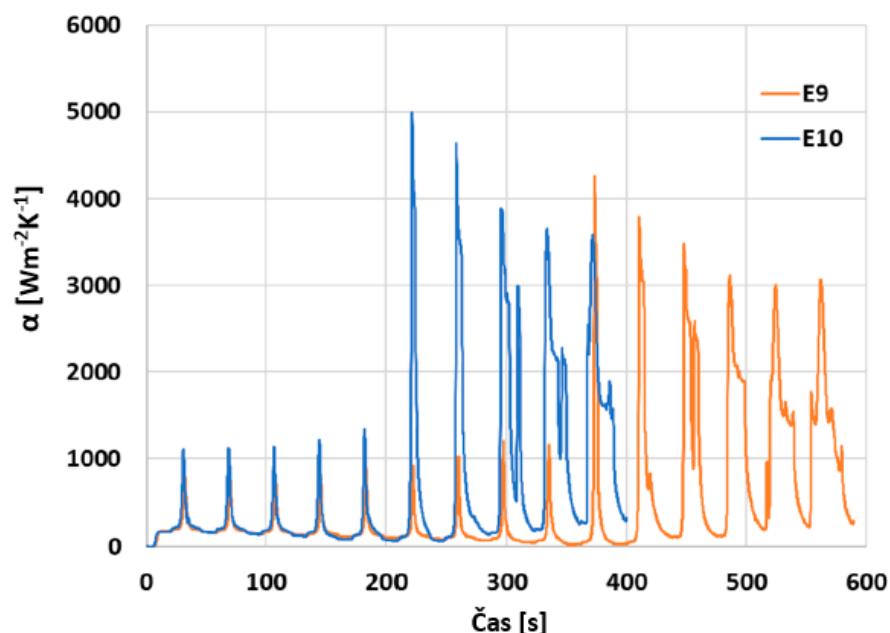
**Tab. 3** Experimentální nastavení

Název Experimentu	Tryska	Vzdálenost o povrchu	Průtok	Tlak vzduchu	Rychlost posuvu
		[mm]	[lmin <sup>-1</sup> ]	[bar]	[m min <sup>-1</sup> ]
E1	Vodo-vzdušná	360	4	2	1
E2	Vodo-vzdušná	200	7	2	1
E3	Vodo-vzdušná	190	20	2	1
E4	Vodo-vzdušná	145	9	2	1
E5	Vodo-vzdušná	345	5	2	1
E6	Vodo-vzdušná	200	10	2	1
E7	Vodo-vzdušná	250	6	0.5	1
E8	Vodo-vzdušná	250	6	1.5	1
E9	Vodo-vzdušná	250	11	1.5	1
E10	Vodo-vzdušná	250	11	3	1
E11	Vodní	250	6	-	1
E12	Vodní	250	11	-	1

Velmi zajímavé je experimentální nastavení například pro experimenty E9 a E10. V tomto případě byl tlak vzduchu a vody měněn tak, aby byl průtok vody konstantní (byla použita stejná tryska). Tlak vody byl pro experiment E9 - 4 bar a pro E10 – 5.2 bar. Z porovnání změřených, vypočtených povrchových teplot (Obr. 17) a součinitele přestupu tepla (Obr. 18) je evidentní různá intenzita chlazení a Leidenfrostova teplota pro konstantní průtok vody.

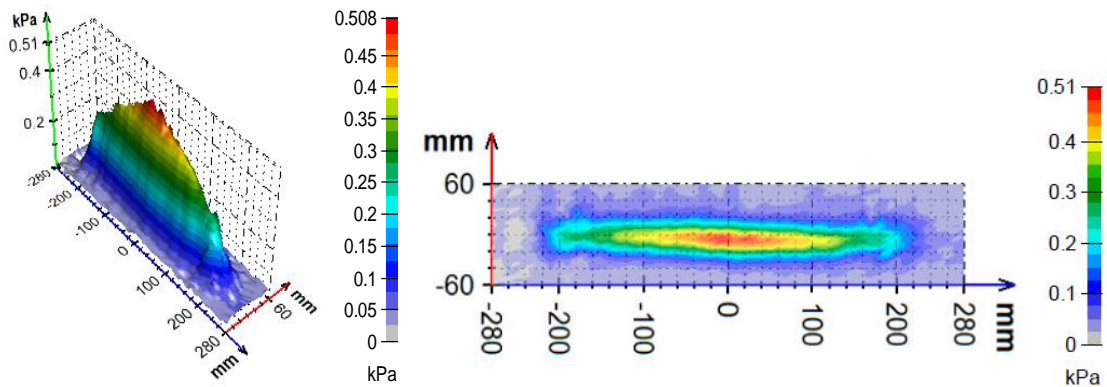


**Obr. 17** Porovnání povrchových a změřených teplot (v hloubce 2 mm) pro experimenty E9 a E10 s identickým průtokem vody, ale s odlišným nastavením poměru tlaku vody a vzduchu, publikováno v [7]

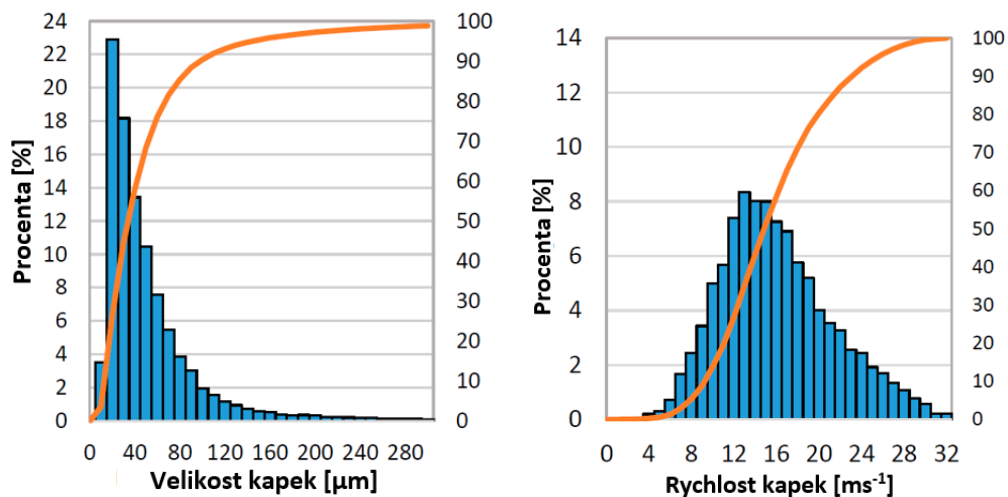


**Obr. 18** Porovnání vypočteného součinitele přestupu tepla pro experimenty E9 a E10 s identickým průtokem vody, ale s odlišným nastavením poměru tlaku vody a vzduchu, publikováno v [7]

Aby mohla být Leidenfrostova teplota predikována pomocí korelací, tak byly provedeny měření hustoty dopadající vody, měření dopadajícího tlaku vody, měření velikosti a rychlosti kapek (ve spolupráci s akademií věd v Ostravě). Příklad výsledku z měřených impaktních tlaků je zobrazen na Obr. 19. Příklad výsledků z měření velikosti a rychlosti kapek je zobrazen na Obr. 20.



**Obr. 19** Příklad měřených impaktních tlaků, 3D pohled vlevo a 2D horní pohled vpravo, publikováno v [7]

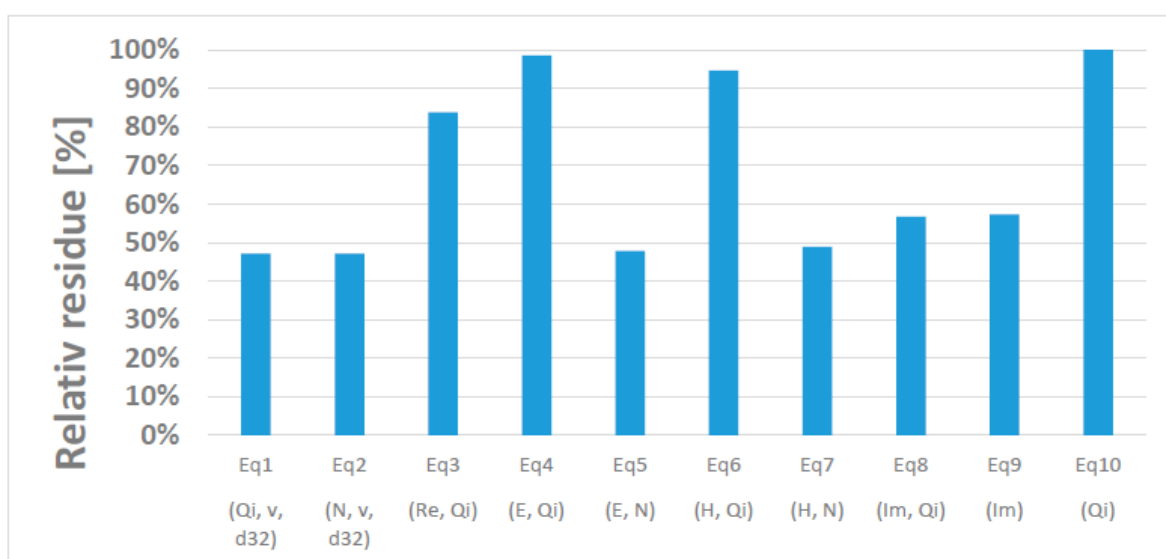


**Obr. 20** Ukázka výsledku měření velikosti a rychlosti kapek pro jednu trysku, publikováno v [7]

Profesor Lee z Arizona State University použil získaná data pro studii, jejíž cílem bylo porovnat různé druhy korelací (predikujících Leidenfrostovu teplotu  $T_L$ ) závislých na následujících parametrech: hustota dopadající vody  $Q_i$  [ $\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$ ], rychlost kapek  $v$  [ $\text{m}\text{s}^{-1}$ ], Sauterův průměr kapek  $d_{32}$  [m], impaktní tlak dopadající vody  $I_m$  [Pa] (Obr. 19), počet kapek na metr čtvereční za sekundu  $N$  [ $\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$ ], kinetická energie kapek  $E$  [J], hybnost kapek  $H$  [ $\text{kg}\text{m}\text{s}^{-1}$ ] a Reynoldsovo číslo  $Re$ . Tyto parametry byly známy celkem pro 24 experimentů. 10 Experimentů E1 – E10 byly použity pro zjištění součinitele přestupu tepla a Leidenfrostovy teploty. Na základě těchto měření bylo zjištěno 10 korelačních vztahů (kombinujících jednotlivé parametry), jejichž přesnost byla testována s měřenými hodnotami. Korelace a porovnání relativních residuí byly provedeny prof. Lee a publikovány v [7]. Následující obrázek (Obr. 21) s testovanými korelačními vztahy byl vložen ze zmíněné publikace v původním vzhledu.

Table 2. List of correlations.

Correlation Number	Formula	Res <sup>2</sup>
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)	$T_L = 825 \cdot Im^{0.174} \cdot Q_i^{0.020}$	2521
Equation (9)	$T_L = 868 \cdot Im^{0.186}$	2546
Equation (10)	$T_L = 474 \cdot Q_i^{0.141}$	4445



**Obr. 21** Porovnání korelačních vztahů 1 – 10 založených na relativních reziduí Res<sup>2</sup>, publikováno v [7]

Doporučené je tedy použít korelaci s parametry průtok vody (Q<sub>i</sub>), rychlost kapiček (v) a Sauterova průměru kapek (d<sub>32</sub>) [7].

$$T_L = 351 \cdot Q_i^{0.111} \cdot v^{0.174} \cdot d_{32}^{0.006}$$

Nejhorší výsledek byl zjištěn pro korelaci uvažující pouze průtok vody, což bývá velmi často používáno v literatuře[7].

### 3 VÝZKUM V OBLASTI VÁLCOVÁNÍ

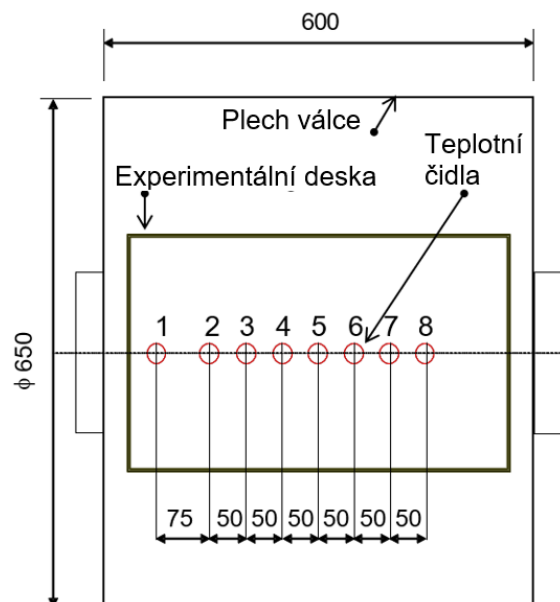
V oblasti válcování se autor zabýval problematikou chlazení válců za tepla a za studena. S požadavky na zvýšení produkce rostou i požadavky na chlazení pracovních válců. Válce jsou více tepelně namáhány kvůli zvyšování rychlosti, redukce a tvrdosti válcovaných materiálů. Vlivem špatného chlazení mohou vznikat například povrchové vady na válcovaném povrchu či může docházet k nerovnoměrnostem po tloušťce vývalku.

#### 3.1 EXPERIMENTÁLNÍ ZAŘÍZENÍ PRO SIMULACI CHLAZENÍ NA ROTUJÍCÍCH POVRŠÍCH

Pro studium chladicích systémů na rotujících površích, bylo vyvinuto laboratorní zařízení zobrazené na Obr. 22. Skládá se z rotujícího válce, který je osazen experimentální deskou s osmi teplotními čidly (Obr. 23). 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 ohřáta 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. Pro simulaci chlazení je většinou používána okrajová podmínka v podobě závislosti součinitele přestupu tepla na pozici válce. Zařízení umožňuje simulovat chlazení pouze jednoho pracovního válce z jedné strany. Takže pro každou stolici jsou studovány případy chlazení na vstupu a výstupu, pro horní a dolní válec zvlášť. Typickými parametry během studia chlazení pracovních válců jsou – úhel rozstříku trysky, typ trysky, natočení trysky kolem své osy, natočení chladicího systému vůči ose válce, průtok a tlak vody, rozložení vody na povrchu (různá pozice a natočení chladicích kolektorů).



**Obr. 22** Schéma experimentálního rotačního zařízení zvané válec (vlevo), fotka tohoto zařízení s chladicími kolektory (vpravo)



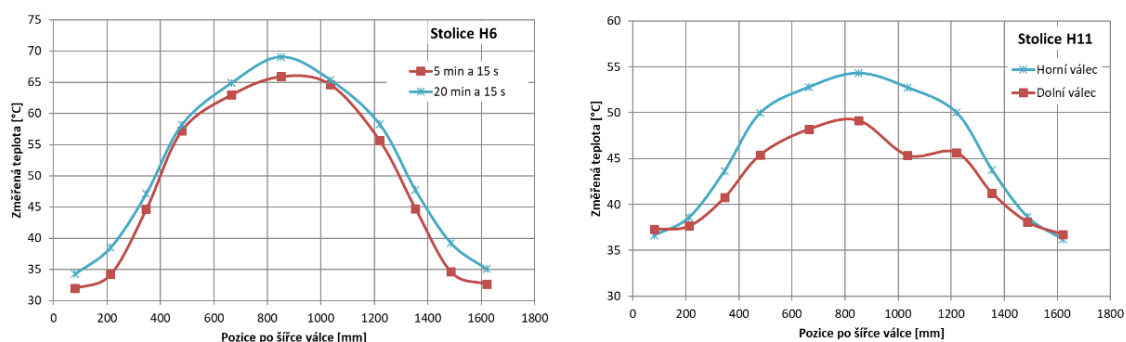
**Obr. 23** Schéma experimentální desky na pracovním válci

### 3.2 OPTIMALIZACE CHLAZENÍ PRACOVNÍCH VÁLCŮ A VERIFIKACE INTENZITY CHLAZENÍ V PRŮMYSLVÝCH 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. Jako příklad optimalizace chlazení pracovních válců může být uvedena spolupráce s US Steel v Košicích, kdy byla provedena rekonstrukce válcovací tratě včetně chlazení válců. Autor se v tomto případě podílel také na provádění verifikace nově nainstalovaného chladicího systému přímo na válcovací trati v Košicích. Měření probíhala pomocí speciální měřicí lišty vyvinuté v Laboratoři přenosu tepla a proudění (Obr. 24). Teploty pracovních válců po válcování, byly naměřeny na všech stolicích. Ukázka posouzení chlazení v USS Košice je zobrazena na Obr. 25. Vlevo je uveden příklad změřených teplot na válci stolice H6, 5 a 20 minut po projetí posledního provalku. Na pravém 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 v chladicím systému.



**Obr. 24** Zařízení pro měření teplot pracovních válců po vyjmutí z válcovací stolice



**Obr. 25** Příklady výsledků měření teplot pracovních válců po válcování v USS Košice, rozdíl mezi teplotou válce 5 a 20 minut po průjezdu posledního provalku (vlevo) a rozdíl mezi teplotami horního a dolního válce jedné stolice (vpravo)

### 3.3 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 válcům a následnému vytržení části povrchu plechu, což se posléze projevilo formou periodicky se opakujících vad na válcovaném povrchu. Na Obr. 26 je zobrazen povrch plechu ze spodní strany (levý sloupec) a horní strany (pravý sloupec) po vyválnování na testovací trati. Jeden z prvních vrypů byl nalezen na spodní straně ve vzdálenosti 228 m od přední hrany plechu (Obr. 26 vlevo nahoře). Počet povrchových vad se s rostoucí vzdáleností válcovaného plechu zvyšoval. Na Obr. 26 vlevo dole je zobrazen plech 418 m po vyválnování, kde je evidentní zvýšený počet vad. Zajímavé také je, že na horní straně plechu nejsou vidět žádné vrypy. Tato zjištění vedla k tezi, že povrchové vady způsobuje špatné mazání a chlazení válců. My jsme se zaměřili na problematiku chlazení.



**Obr. 26** Vrypy na plechu způsobené při válcování za studena na testovací trati, spodní strana plechu vlevo a horní strana plechu vpravo

Během válcování za studena jsou běžně používány emulze (směs oleje a vody). 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 pomocí aditiv. Pro tyto testy bylo použito zařízení pro statické testy (Obr. 27), které se skládá z válcové komory, ve které je umístěna tryska, z pece, teplotního regulátoru a dataloggeru.

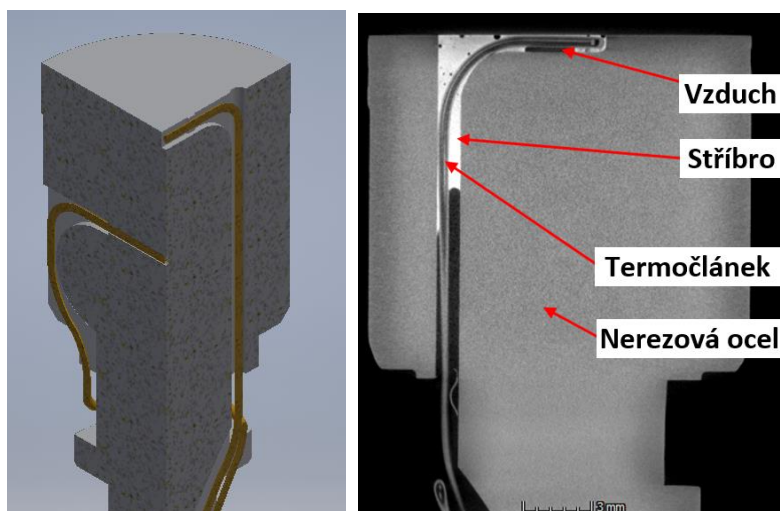
Teplotní senzor je vyroben z nerezové oceli (Obr. 28). Termočlánek typu K je prostrčen zespodu čidla do drážky na povrchu. Drážka s termočlánekem je poté zapájena stříbrnou pájkou. Takto vyrobené čidlo je vsazeno do ketronového držáku (plastu odolného teplotám do 340 °C).

Každý experiment začal vytvořením emulze smícháním požadovaného oleje s vodou na dané teplotě (51°C). Emulze je nutné připravovat před experimentem, protože stabilita některých emulzí je v řádu několika desítek hodin. Po přípravě emulze byl teplotní senzor ohřát na teplotu 250°C. Po dosažení a ustálení počáteční teploty senzoru byl nastaven požadovaný tlak vody a senzor byl přemístěn nad trysku. Uvnitř komory byl umístěn deflektor, který byl otevřen ve chvíli, kdy byly nastaveny všechny parametry experimentu. Po ukončení experimentu byla zaznamenaná teplota (frekvence 320 Hz) nahrána do počítače a použita pro výpočet povrchové teploty senzoru spolu se součinitelem přestupu tepla pomocí inverzní úlohy. Nižší uvedené výsledky projektu MANCOOL byly publikovány v [14].





**Obr. 27** Zařízení pro statické měření vlivu emulzí a různých přísad na velikost součinitele přestupu tepla, řez teplotního senzoru se zabudovaným termočlánkem, publikováno v [14]



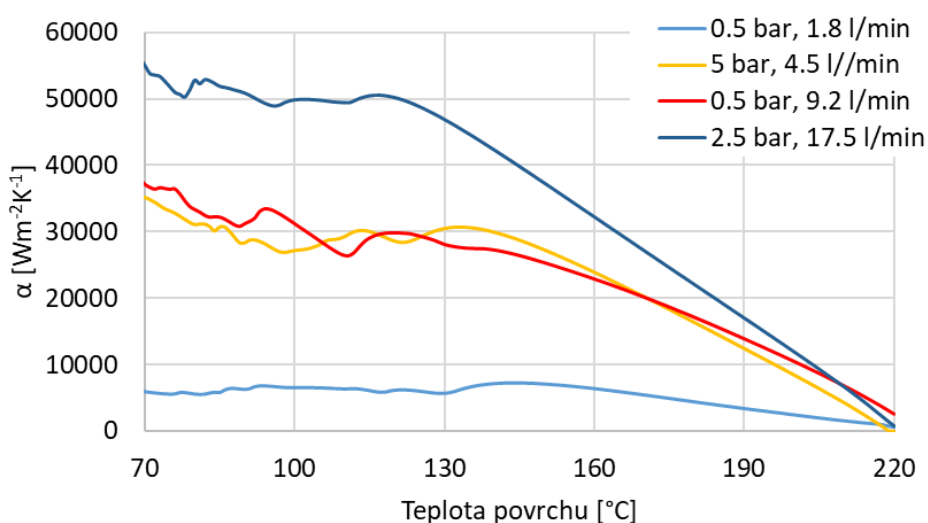
**Obr. 28** Teplotní senzor pro statické testy, publikováno v [14]

Všechny statické experimenty byly provedeny se dvěma tryskami s kuželovým rozstříkem. Vzdálenost senzoru od ústi trysky byla konstantní. V Tab. 4 jsou specifikovány příslušné tlaky a průtoky pro jednotlivé experimenty. Každý parametr byl studován pro tyto 4 různé průtoky.

**Tab. 4** Nastavení tlaků a průtoků při statických experimentech, publikováno v [14]

Tryska	Tlak chladiva	Průtok chladiva
	[bar]	[lmin <sup>-1</sup> ]
460.604	0.5	1.8
	5	4.5
460.884	0.5	9.2
	2.5	17.5

Nejprve byly provedeny testy s vodou. Výsledky pro jednotlivé průtoky jsou zobrazeny na Obr. 29. Tyto výsledky ukázaly závislost součinitele přestupu tepla na poměru průtoku vody a tlaku. Velmi zajímavý výsledek by zjištěn pro experiment s poměrem tlaku/průtoku: 5/4.5 a 0.5/9.2. Součinitel přestupu tepla byl pro tyto experimenty porovnatelný i přesto, že u druhého experimentu byl dvojnásobný průtok vody.



**Obr. 29** Velikost součinitele přestupu tepla v závislosti na povrchové teplotě pro různé průtoky vody, publikováno v [14]

Správnost tohoto výsledku byla potvrzena následujícím jednoduchým odhadem součinitele přestupu tepla pomocí rovnic dostupných v [15]:

$$\alpha = \frac{Nu \cdot \lambda}{L}$$

kde:  $\alpha$  je součinitel přestupu tepla [ $\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$ ],  $Nu$  je Nusseltovo číslo,  $\lambda$  je teplotní vodivost [ $\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ ] a  $L$  je tloušťka [m].

$$Nu = 4.7 \cdot Re^{0.61} \cdot Pr^{0.32}$$

kde:  $Re$  je Reynoldsovo číslo a  $Pr$  je Prandtlovo číslo.

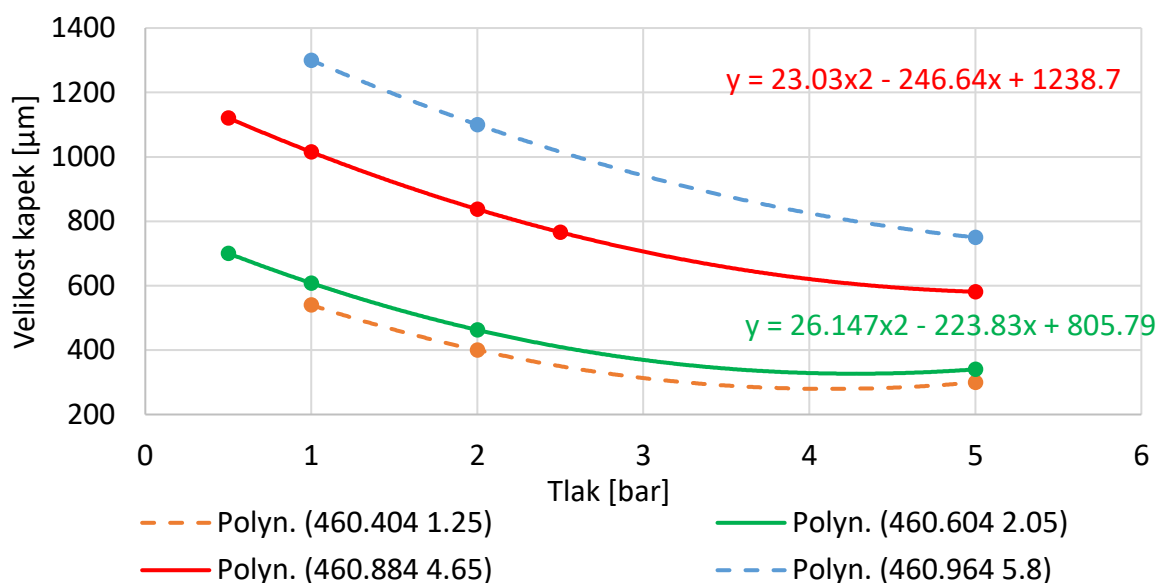
$$Re_{D_{32}} = \frac{\dot{m}_L \cdot D_{32}}{\mu}$$

kde:  $\dot{m}_L$  je hustota dopadající vody [ $\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ],  $D_{32}$  je Suaterova průměru kapek a  $\mu$  je dynamická viskozita [ $\text{N s m}^{-2}$ ].

$$Pr = \frac{c_p \cdot \mu}{\lambda}$$

kde:  $c_p$  je měrná tepelná kapacita [ $\text{J kg}^{-1}\text{K}^{-1}$ ],  $\lambda$  je teplotní vodivost [ $\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ ] a  $\mu$  je dynamická viskozita [ $\text{N s m}^{-2}$ ].

Velikost kapek byla určena pomocí katalogových hodnot od výrobce [16]. Ten zveřejnil velikost kapek pro trysky 460.404 a 460.964 (Obr. 30 čárkované křivky). Z nich byly pomocí lineární interpolace stanoveny rovnice pro výpočet velikostí kapek pro trysky 460.604 (zelená rovnice) a 460.884 (červená rovnice). Vypočtené velikosti kapek jsou vypsány v Tab. 5 [14].

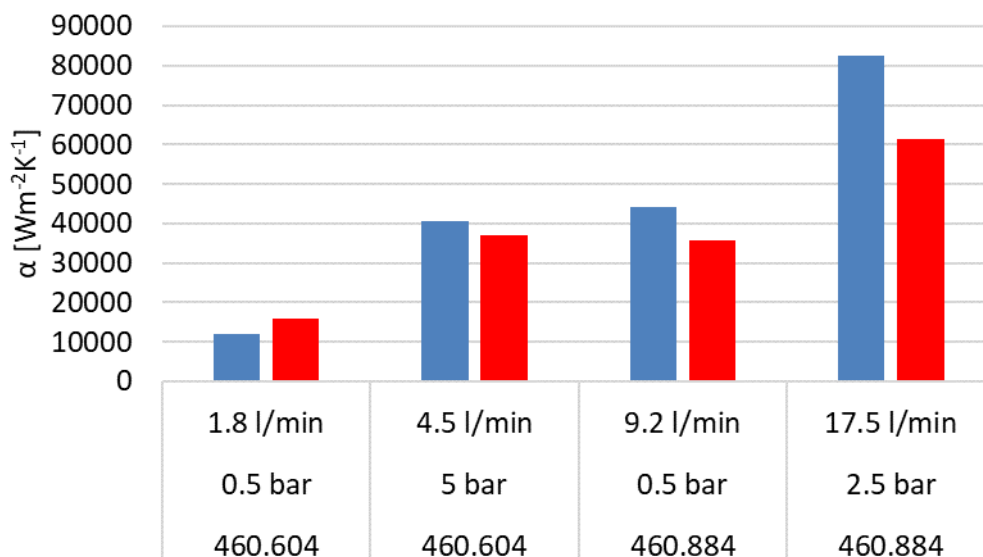


**Obr. 30** Velikost kapek od výrobce pro trysky: 460.404 (modrá čárkovaná křivka), 460.964 (oranžová čárkovaná křivka). Plné křivky zobrazují odhad velikosti kapek pro trysky 460.604 (zelená křivka) a 460.884 (červená křivka), publikováno v [14]

**Tab. 5** Vypočtené velikosti kapek pro definované trysky a tlaky [14]

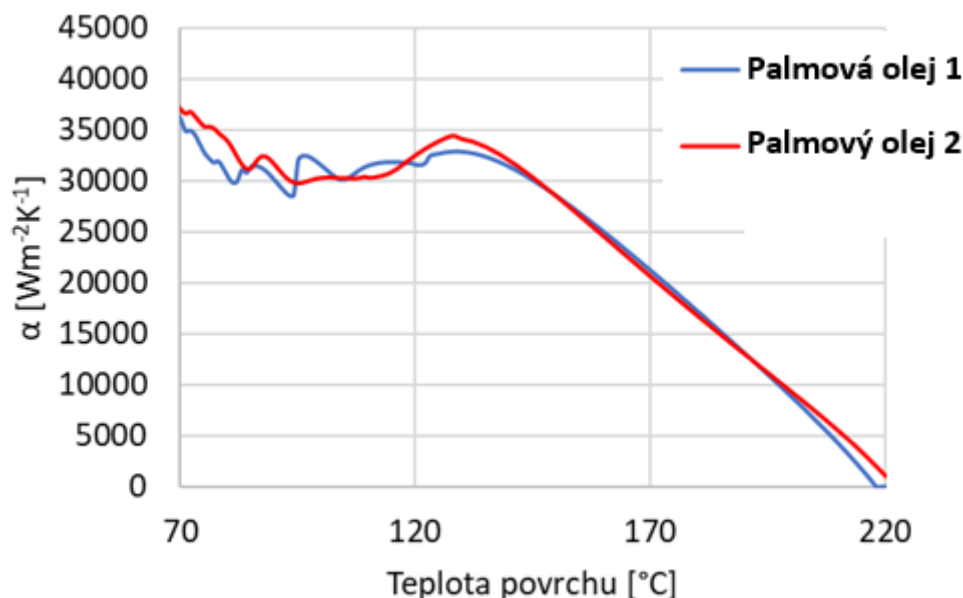
Tryska	Průměr ústí trysky [mm]	Tlak [bar]	Průtok vody [lmin <sup>-1</sup> ]	Velikost kapek [μm]
460.604	2.05	0.5	1.81	700
460.604	2.05	5	4.54	340
460.884	4.65	0.5	9.19	1121
460.884	4.65	2.5	17.49	766

Vypočtené velikosti součinitele přestupu tepla ukázaly shodu se změřenými daty ve smyslu porovnatelnosti velikostí intenzit chlazení pro průtok 4.5 a 9.2 lmin<sup>-1</sup> (Obr. 31).



**Obr. 31** Porovnání velikosti součinitele přestupu tepla pro změřené (modré sloupce) a vypočtené hodnoty (červené sloupce), teplotní interval 70 – 90°C, publikováno v [14]

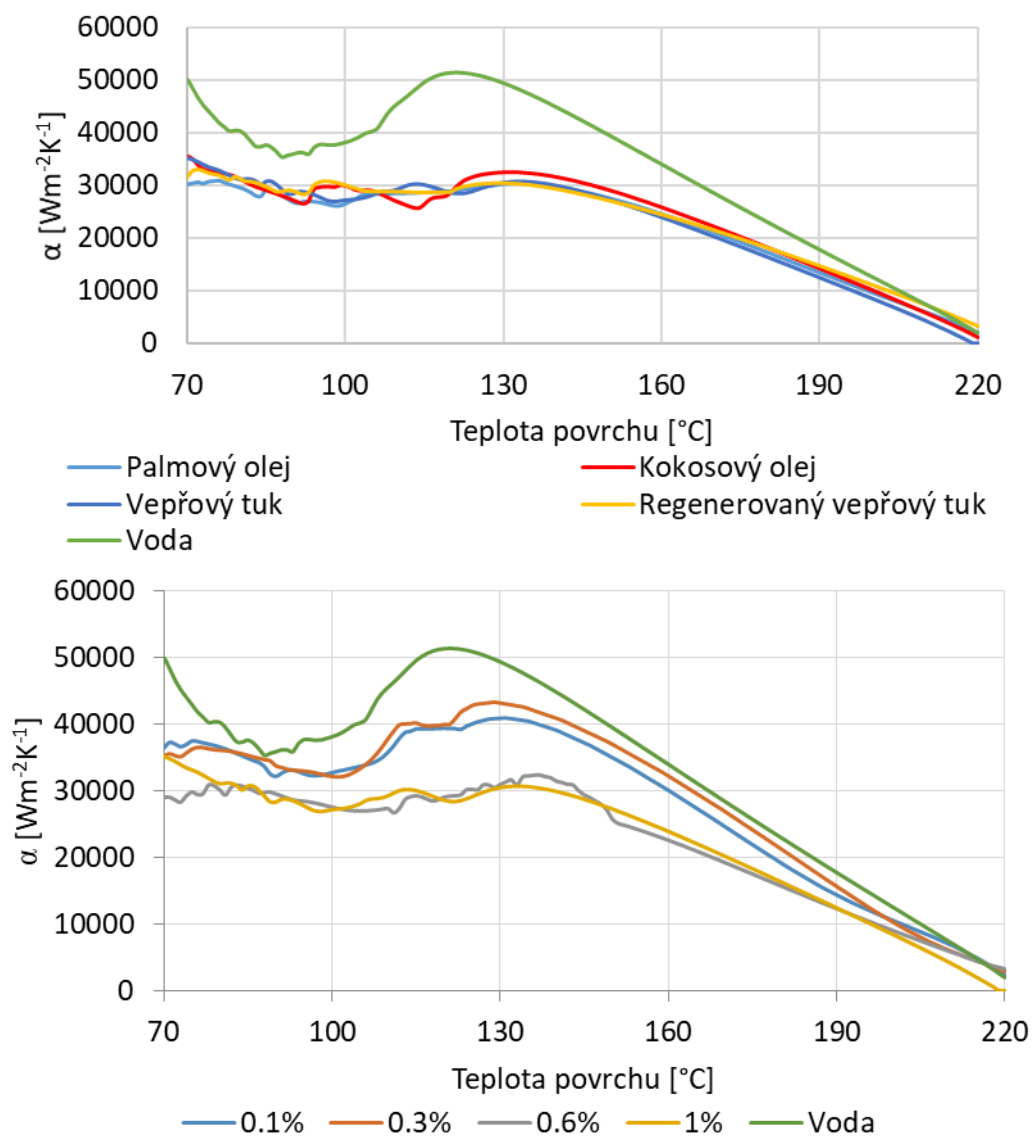
Další testy byly zaměřeny na opakovatelnost měření. Na Obr. 32 je ukázán příklad typické opakovatelnosti měření, která byla testována pro všechny emulze. V tomto případě se jednalo o emulzi na bázi palmového oleje.



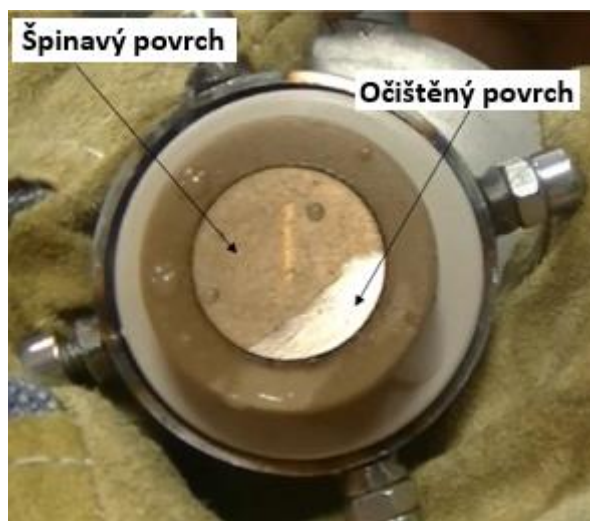
**Obr. 32** Ukázka typické opakovatelnosti měření pro experiment s palmovým olejem, publikováno v [14]

Po výše uvedených experimentech byly provedeny testy s jednotlivými emulzemi na bázi palmového, kokosového oleje a vepřového tuku v koncentracích od 0,1% do 1% oleje ve vodě. Výsledky ukázaly, že všechny typy emulzí se stejnou koncentrací chladí s podobným účinkem (ukázka typického výsledku na Obr. 33 nahoře). Dále se ukázalo, že i velmi malé rozmíchané množství oleje ve vodě způsobuje pokles součinitele přestupu tepla (ukázka typického výsledku na Obr. 33 dole).

Regenerovaná emulze vzniká vyčištěním již použité emulze. Z porovnání výsledků experimentů vyplývá, že regenerace a opětovné použití emulze nemá vliv na velikost součinitele přestupu tepla i přesto, že tepelný senzor byl po experimentu s regenerovanou emulzí značně zašpiněn. Špinavý povrch senzoru je vidět na Obr. 34.

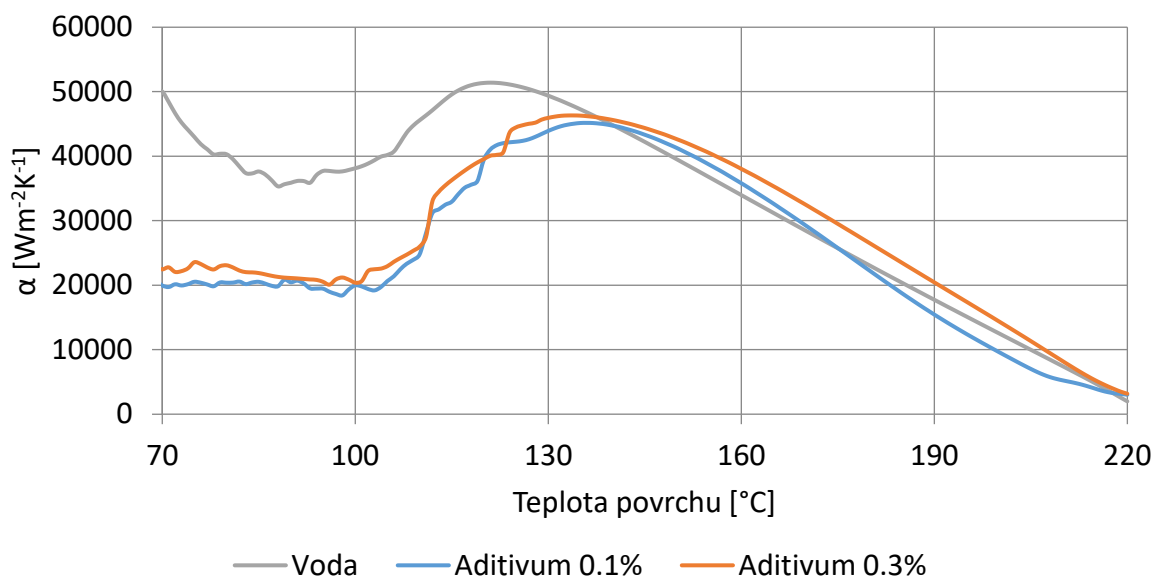


**Obr. 33** Ukázka vlivu různých emulzí na součinitel přestupu tepla (vlevo) a různých koncentrací oleje (vpravo), publikováno v [14]



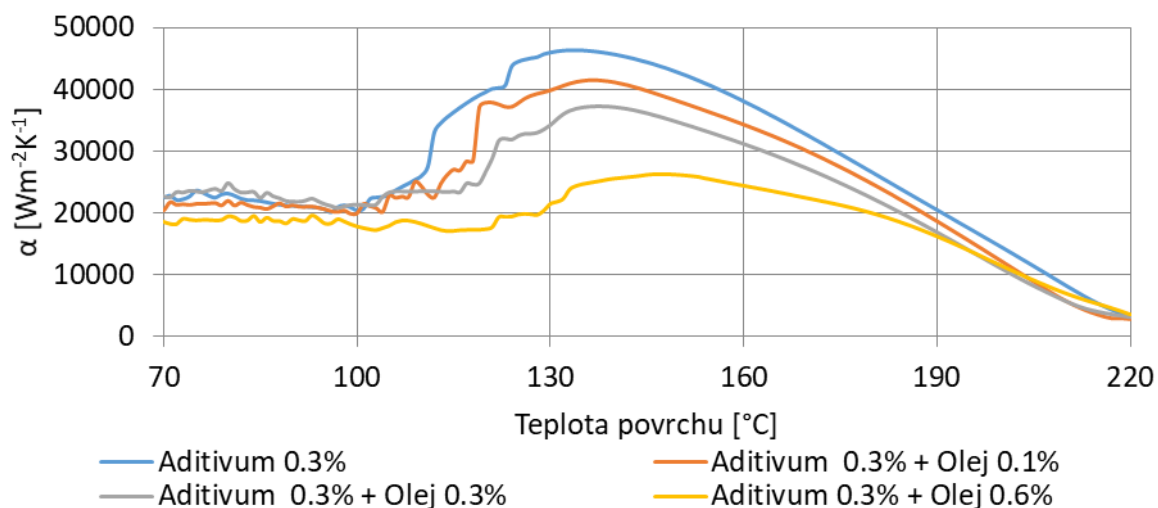
**Obr. 34** Ukázka povrchu teplotní senzoru po experimentech s regenerovanou emulzí na bázi vepřového tuku, publikováno v [14]

Dalším krokem ve výzkumu bylo přidání malého množství aditiva Bonderite L-AD EP 5501. Při prvních testech bylo aditivum smícháno pouze s vodou. Výsledky jsou zobrazeny na Obr. 35. Aditivum, podobně jako oleje, snižuje velikost součinitele přestupu tepla.

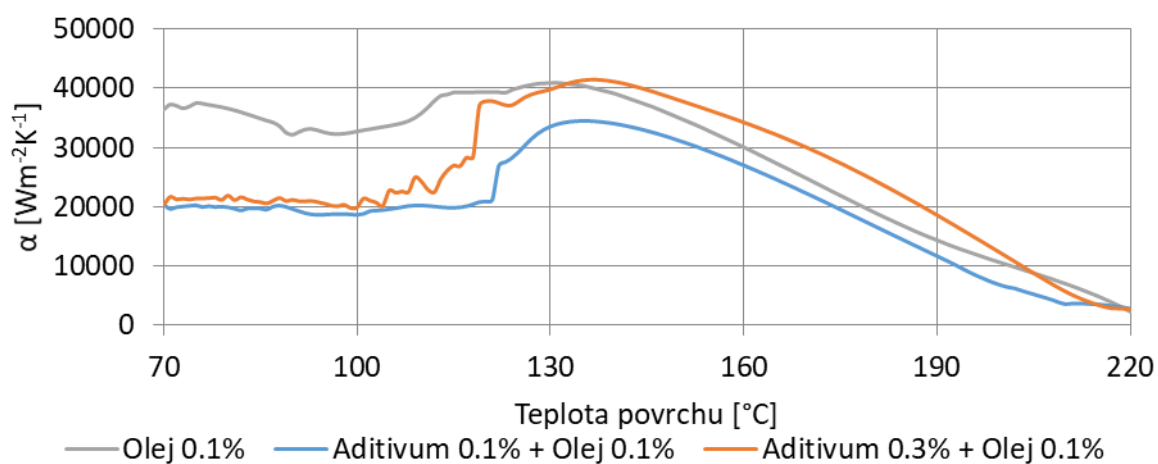


**Obr. 35** Porovnání velikosti součinitele přestupu tepla pro vodu a vodu s příměsí aditiv, publikováno v [14]

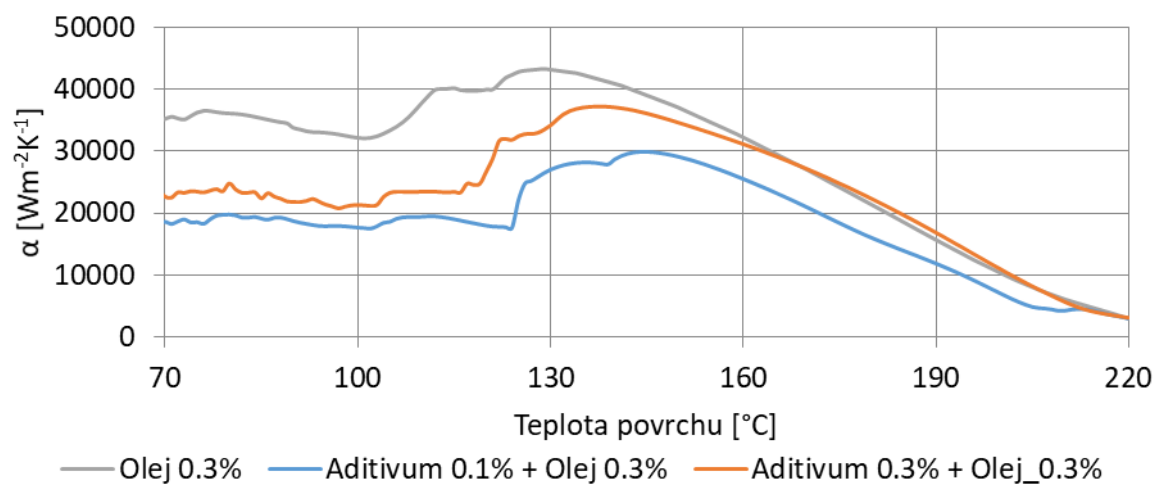
Dále byly testovány různé kombinace koncentrací aditiv a olejů ve vodě. Nejprve bylo konstantní množství aditiva a poté bylo konstantní množství oleje. Typické výsledky jsou zobrazeny na Obr. 36 - Obr. 38. Při konstantním množství aditiva klesá součinitel přestupu tepla s rostoucí koncentrací oleje v emulzi (Obr. 36). Naopak při konstantním množství oleje, součinitel přestupu tepla roste s rostoucí koncentrací aditiv (Obr. 37 a Obr. 38).



**Obr. 36** Výsledky experimentů s konstantním množstvím aditiv a rostoucím množstvím oleje v emulzi, publikováno v [14]

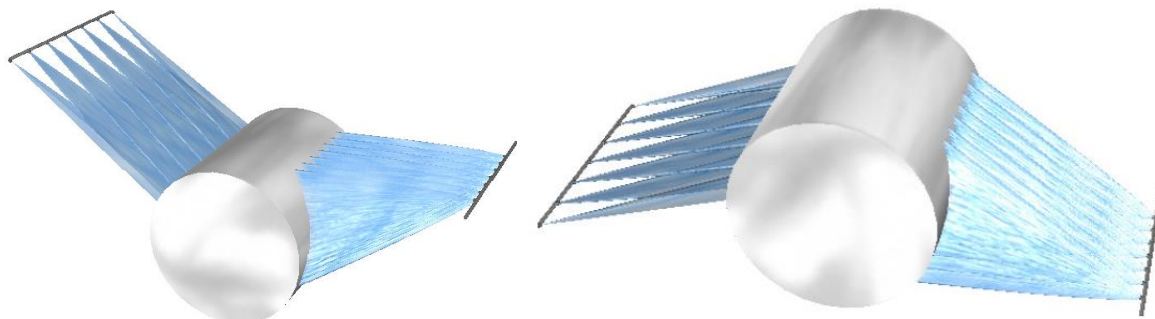


**Obr. 37** Výsledky z experimentů pro konstantní množství oleje v emulzi (0,1%) a rostoucímu podílu aditiva, publikováno v [14]

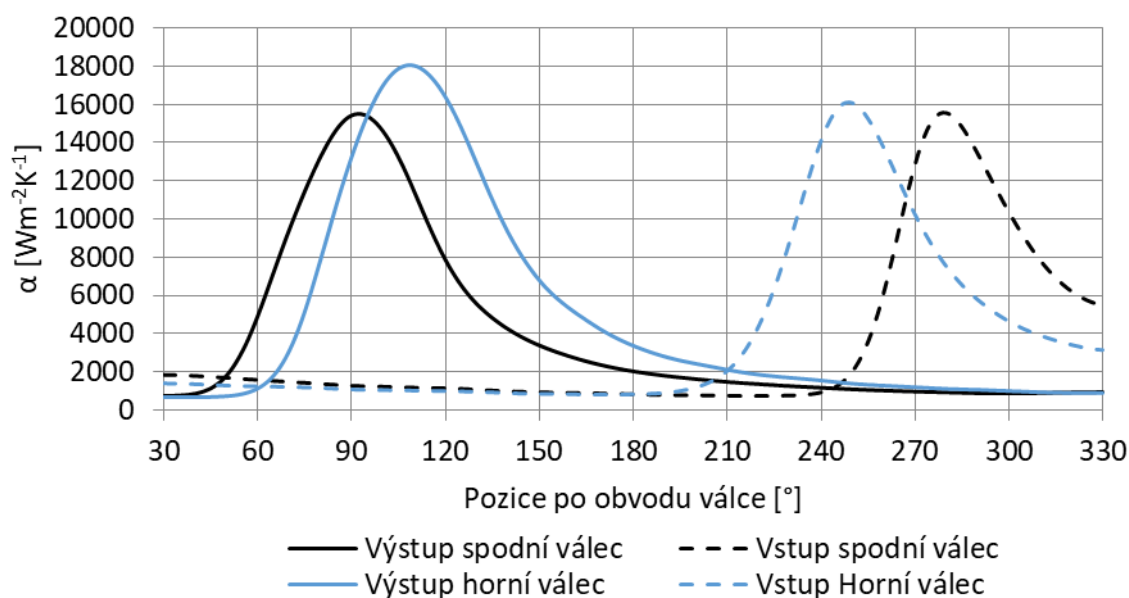


**Obr. 38** Výsledky z experimentů pro konstantní množství oleje v emulzi (0,3%) a rostoucímu podílu aditiva, publikováno v [14]

Druhou částí projektu byla optimalizace chlazení pracovních válců pomocí změny geometrie ostříku. V tomto případě bylo použito zařízení pro simulaci chlazení rotačních povrchů (Obr. 22). V první fázi zde byla zjištěna intenzita chlazení pro stávající konfiguraci používanou v TATA steel. Schéma originální konfigurace chlazení v TATA je zobrazeno na Obr. 39. Velikost součinitele přestupu tepla na pozici je zobrazena na Obr. 40



**Obr. 39** Schéma chladicí konfigurace v TATA Steel, horní válec vlevo a dolní válec vpravo



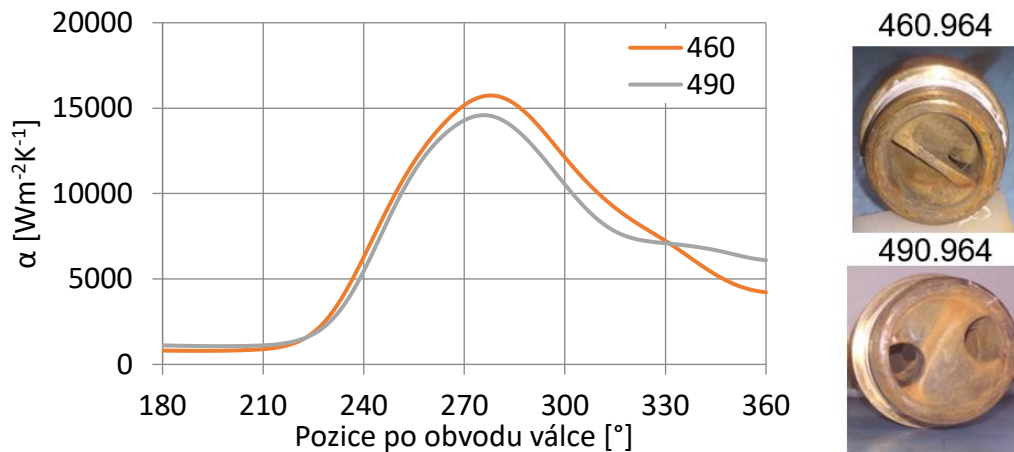
**Obr. 40** Součinitel přestupu tepla pro originální konfiguraci v TATA Steel

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. Některé příklady výsledků z experimentů jsou zobrazeny na Obr. 41 - Obr. 44. Data byla zprůměrována na teplotním intervalu 100 – 300°C.

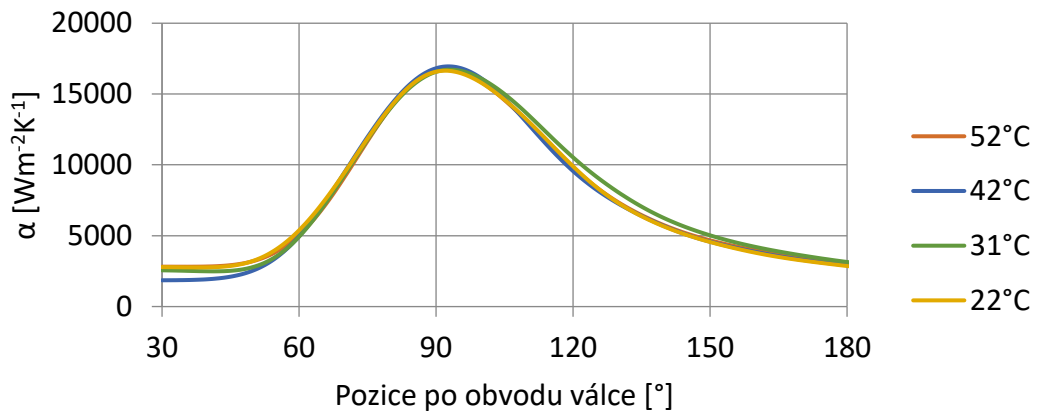
Společnost Lechler změnila vstupní design kuželových trysek. Řada 460 je zastaralý typ, u kterého byly vstupy vody velmi malé a tryska se v provozu ucpávala. Tuto řadu nahradili řadou 490 s podstatně většími otvory. Vliv typu trysky se neprokázal a staré trysky jsou zaměnitelné za nové (Obr. 41). Dále jsou ukázány příklady vlivu dalších parametrů sloužících k optimalizaci chlazení: tlak vody a úhel natočení trysek kolem své osy.

Ukázka porovnání součinitele přestupu tepla pro originální a novou, optimalizovanou konfiguraci (výstup, spodní válec) je zobrazena na Obr. 45. Optimalizace zvýšila velikost součinitele přestupu tepla a chladicí plochu. Spotřeba emulze byla snížena až o 34%.

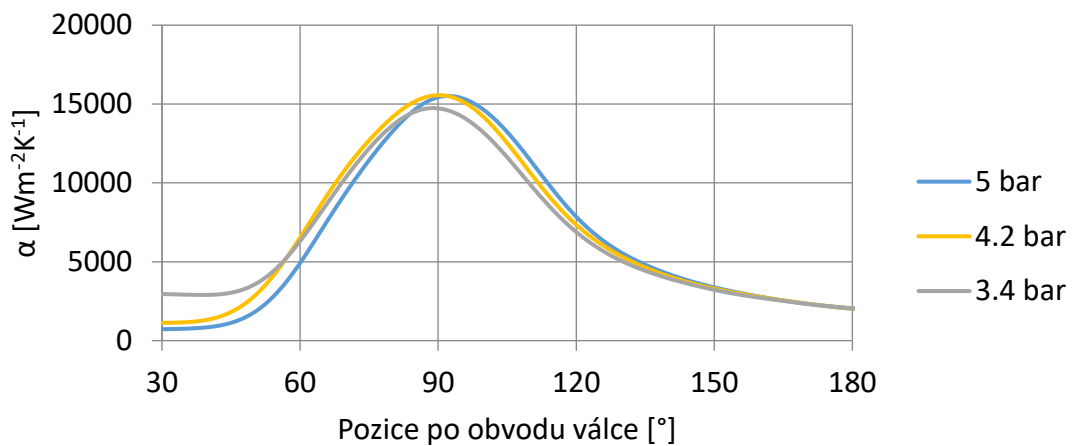




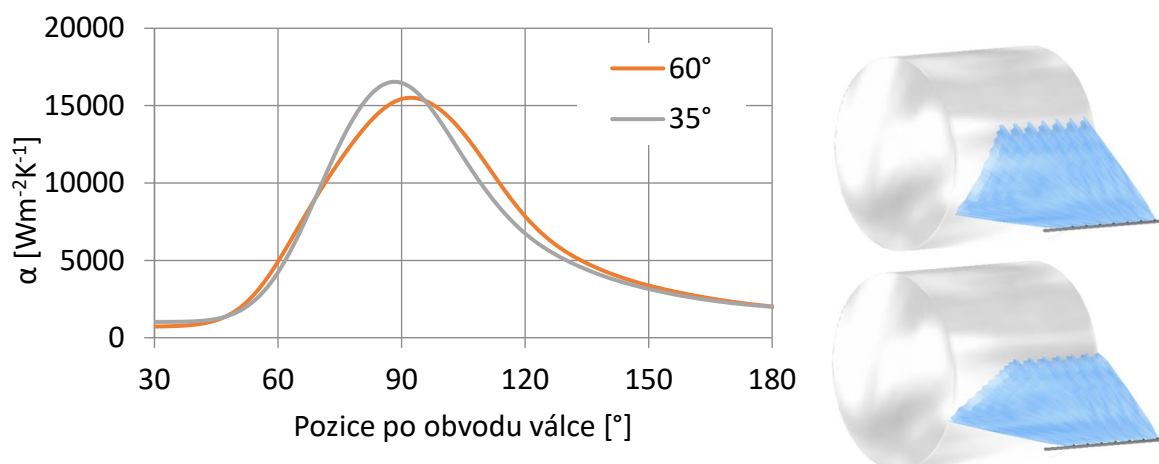
**Obr. 41** Příklad vlivu ústí rysky na velikost součinitele přestupu tepla, řada 460 je zastaralá a řada 490 je nová prodejní řada



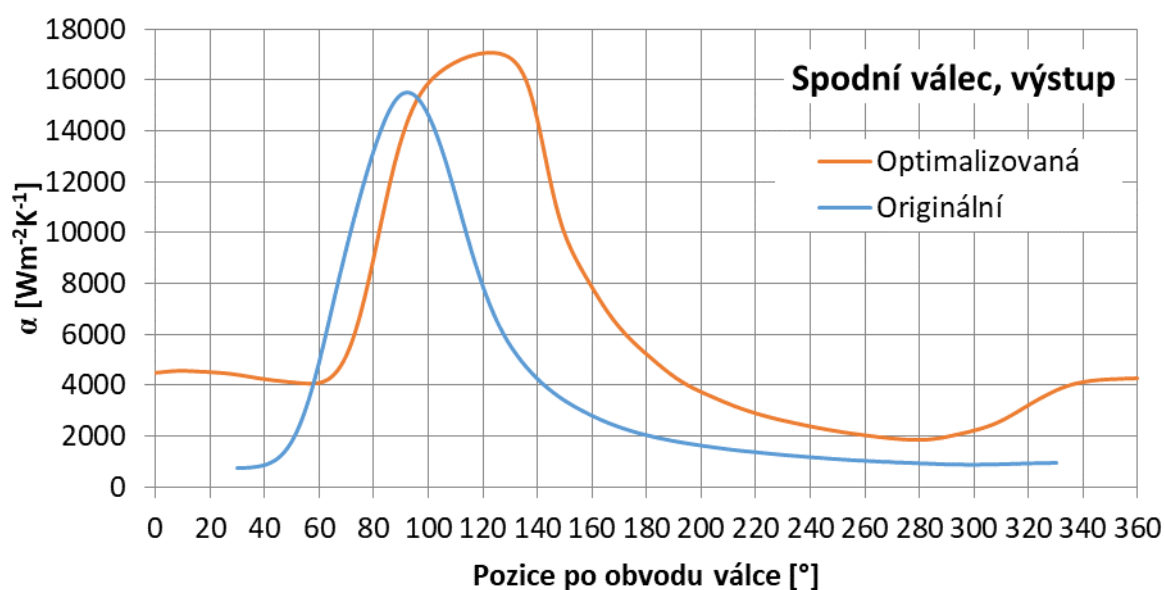
**Obr. 42** Vliv teploty vody na velikost součinitele přestupu tepla



**Obr. 43** Příklad závislosti součinitele přestupu tepla na tlaku vody

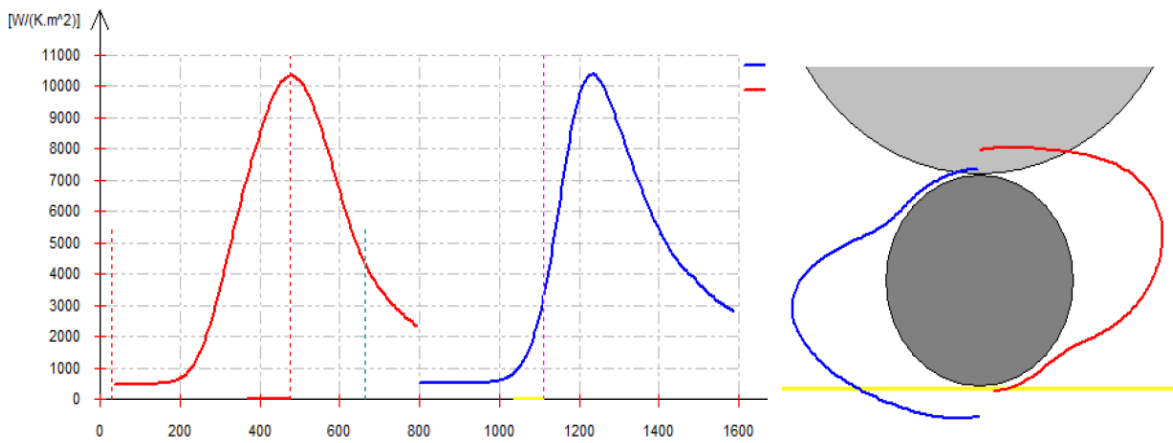


**Obr. 44** Velikost součinitele přestupu tepla pro dvě různá natočení trysek – 35° a 60°



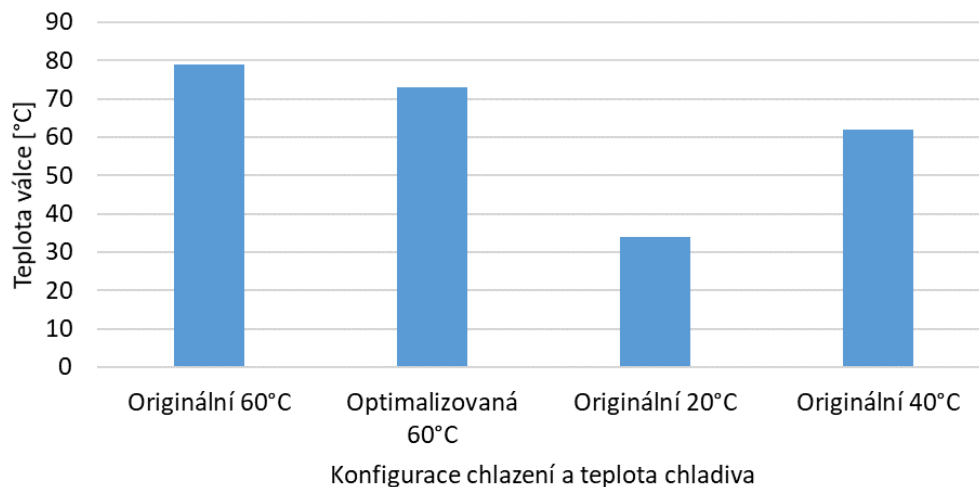
**Obr. 45** Ukázka porovnání originální a optimalizované konfigurace chlazení spodní válce na výstupní straně provalku, publikováno v [14]

Pomocí znalosti okrajových podmínek pro stávající a optimalizovaný chladič systém byly provedeny simulace chlazení pracovního válce pomocí programu vyvinutému v Laboratoři přenosu tepla a proudění zvanému Simroll. Ukázka okrajové podmínky v Simroll software je zobrazena na Obr. 46.



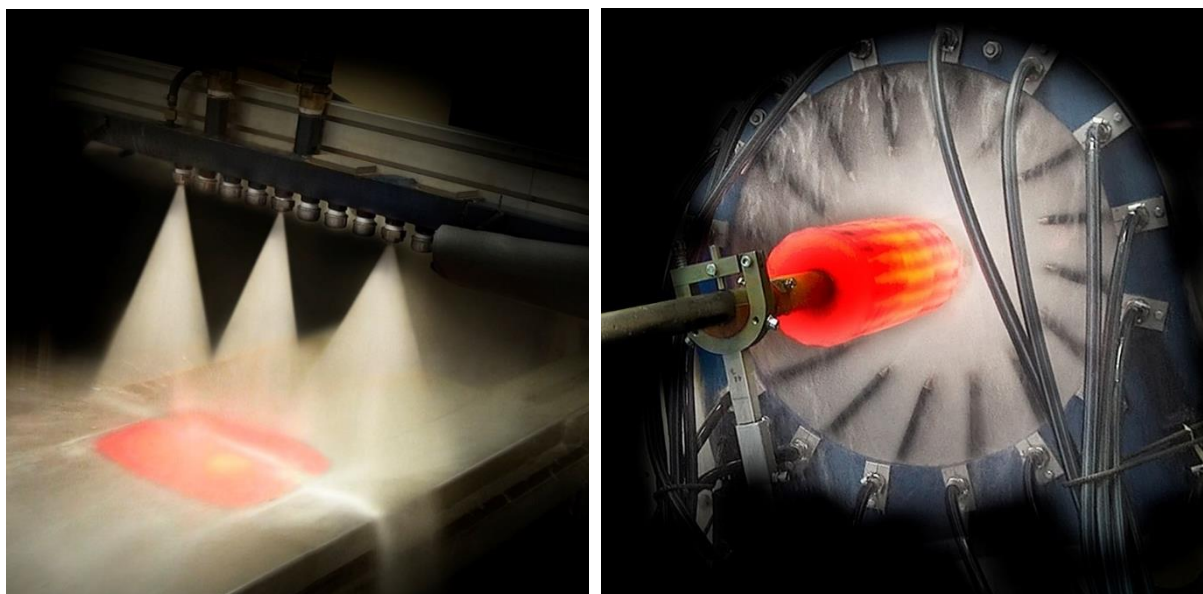
**Obr. 46** Ukázka okrajové podmínky pro simulaci chlazení v Simroll

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 (Obr. 47). To však není možné, protože minimální pracovní teplota emulze je 50°C. Navržené řešení snížení teploty pracovních válců spočívalo ve využití vodního nože, který by separoval chlazení válce od mazání. V tomto případě by bylo možné využít, pro chlazení, vodu o nižší teplotě než emulzi. Dalším benefitem by byla vyšší kontrolovatelnost mazání ve válcovací mezeře.



**Obr. 47** Výsledná teplota válce ze simulací pro různé konfigurace a teploty vody

## 4 VÝZKUM V OBLASTI TEPELNÉHO ZPRACOVÁNÍ



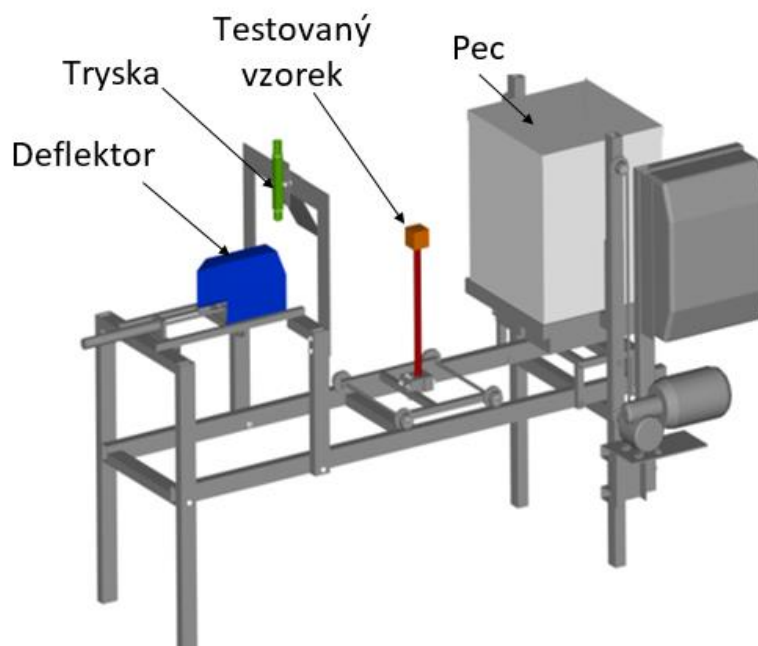
Tepelné zpracování nabízí nové možnosti reakce na zvyšující se nároky na produkty z ocelářského průmyslu. Pomocí tepelného zpracování je možné vyrábět produkty se stejnými mechanickými vlastnostmi a nižšími výrobními náklady pomocí snížení obsahu drahých legujících prvků. Další příklad výhody tepelného zpracování můžeme najít i v automobilovém průmyslu, kde je kladen veliký důraz na hmotnost jednotlivých komponent vozidla. Pomocí tepelného zpracování je možné snížit hmotnost kovových konstrukcí vozidla při zlepšení mechanických vlastností.

Autor se při řešení výzkumných projektů v oblasti tepelného zpracování zaměřil hlavně na oblast trubek, H-profilů, tenkých a tlustých plechů. V těchto případech se jednalo zejména o výzkumnou činnost pro průmyslové partnery. Jako příklad mohu uvést společnosti: Fives Stein ve Francii, Primetals technologies v Itálii, Posco v Jižní Koreji, Třinecké železárný v České republice a další.

V Laboratoři přenosu tepla a proudění byly vyvinuty čtyři experimentální zařízení, na nichž je možné provádět testy pro tepelné zpracování.

### 4.1 EXPERIMENTÁLNÍ ZAŘÍZENÍ PRO TESTOVÁNÍ PROKALITELNOSTI

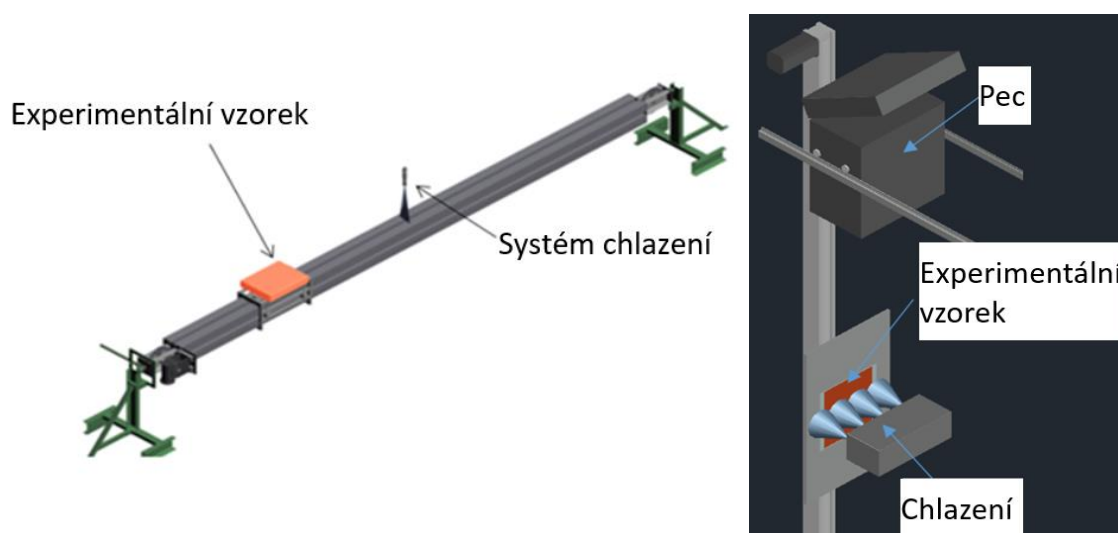
První zařízení umožňuje provádět zkoušku prokalitelnosti (Obr. 48). Skládá se z pece, trysky, posuvného vozíku pro vzorek a deflektoru, jež umožňuje posun vzorku z pece do pozice pod trysku, aniž by došlo k ostříknutí povrchu vodou. Princip měření je podobný Jominiho zkoušce prokalitelnosti s tím rozdílem, 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.



**Obr. 48** Schéma zařízení pro zjišťování prokalitelnosti ocelových vzorků

#### 4.2 EXPERIMENTÁLNÍ ZAŘÍZENÍ PRO SIMULACI CHLAZENÍ RYCHLE POHYBUJÍCÍCH SE VZORKŮ

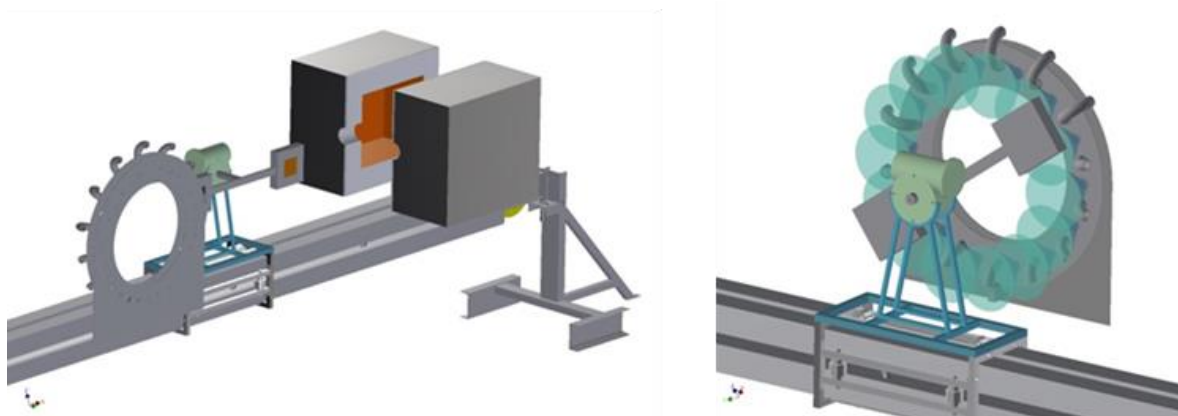
Další dvě experimentální zařízení slouží pro simulaci chlazení vertikálně a horizontálně pohybujících se produktů (Obr. 49). Obě zařízení se skládají z nosného kovového rámu, na němž je umístěn pohybující se vozík. K tomuto vozíku je připevněn experimentální vzorek s teplotními senzory. Vzorek je nejprve ohřát v peci na požadovanou startovací teplotu a poté je reverzně posouván požadovanou rychlostí skrz chladicí sekci. Změřená data jsou opět použita pro inverzní výpočet a vyhodnocena v podobě závislosti součinitele přestupu tepla na teplotě povrchu a pozici v chladicí sekci ve směru pohybu vzorku.



**Obr. 49** Schémata experimentálních zařízení pro simulaci chlazení horizontálně (vlevo – Lineární stand) a vertikálně (vpravo – Vertikální stand) pohybujících se vzorků

### 4.3 ZAŘÍZENÍ PRO SIMULACI CHLADICÍCH SEKCÍ V REÁLNÉ DÉLCE

Posledním, čtvrté, zařízení (Obr. 50) 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. 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 intenzivním, jemným chlazením a vypnutí chlazení. Ve vzorku jsou umístěny termočlánky pro kontrolu teplotního režimu. Vzorek je po sléze vyřezán z ramene a podroben metalurgickým testům.



**Obr. 50** Zřízení pro simulaci reálných chladicích systému

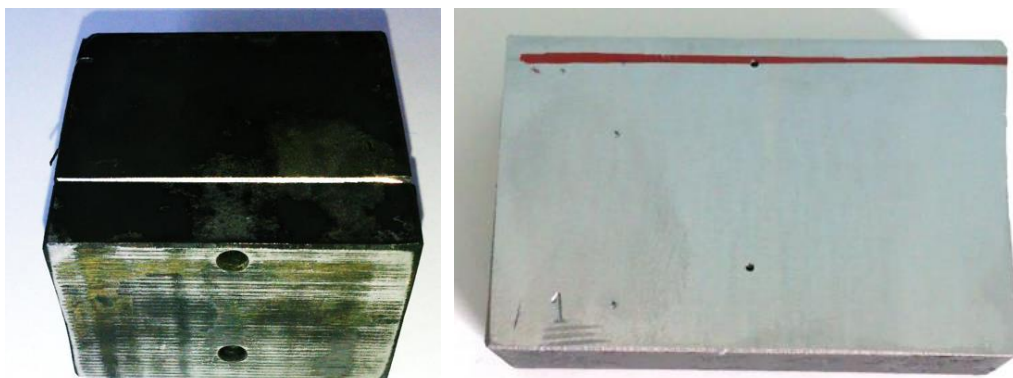
### 4.4 PROCES VÝVOJE CHLADICÍHO ZAŘÍZENÍ PRO TEPELNÉ ZPRACOVÁNÍ

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.

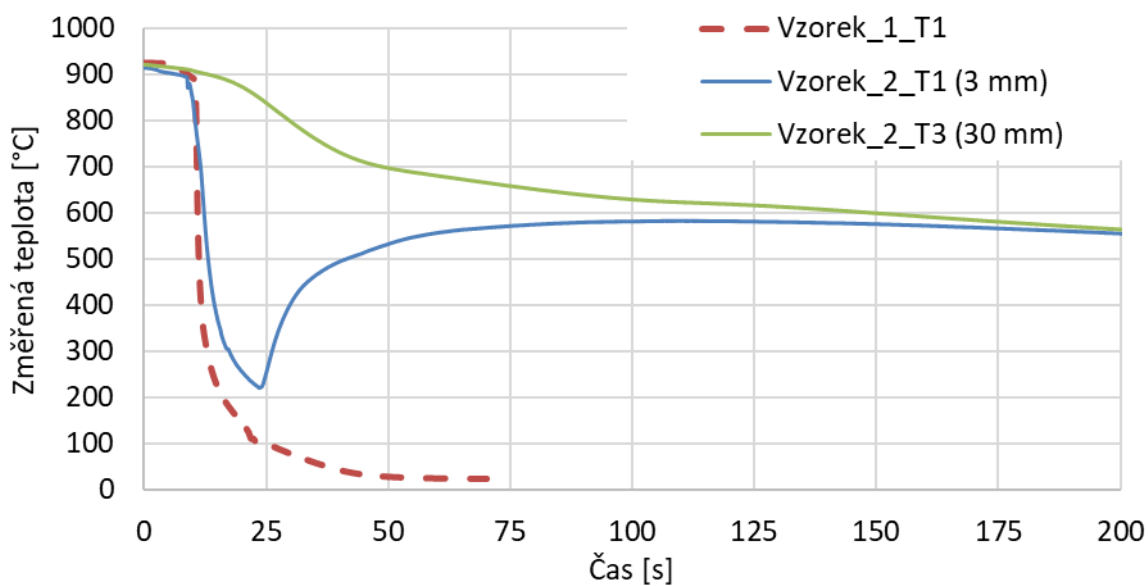
Do první fáze vstupují požadavky metalurgů na chladicí systém. V této fázi je provedena modifikovaná Jominiho zkouška prokalitelnosti pomocí zařízení uvedeného výše na Obr. 48. Pro tento účel byla vybrána ocel S355J2 s uhlíkovým ekvivalentem 0.46 %. Její chemické složení je uvedeno v Tab. 6. Do vzorků o rozměrech 60 x 60 x 40 mm byly instalovány dva termočlánky typu K ve vzdálenosti 3 a 30 mm od chlazeného povrchu (Obr. 51). Dva vzorky prošly různými režimy chlazení (Obr. 52). Oba vzorky byly po zakalení rozříznuty a změřené tvrdosti před a po zakalení byly porovnány (Obr. 53). K měření tvrdosti byl použit přístroj Innovatest Nexus 4303. Z porovnání je patrné zvýšení tvrdosti po tepelném zpracování.

**Tab. 6** Chemické složení S355 J2 použité pro zkoušky prokalitelnosti

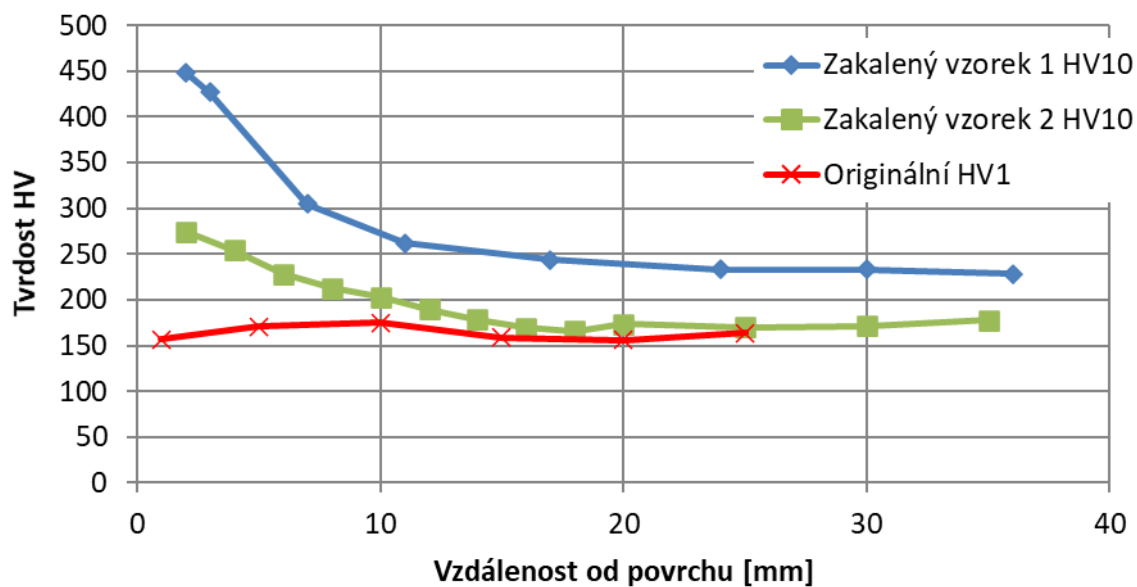
C	Mn	Cr	Mo	V	Ni	Cu
0.181	1.520	0.070	0.005	0.003	0.050	0.060



**Obr. 51** Vzorek S355J2 po zakalení (vlevo) a odříznutá část vzorku pro zkoušky tvrdosti

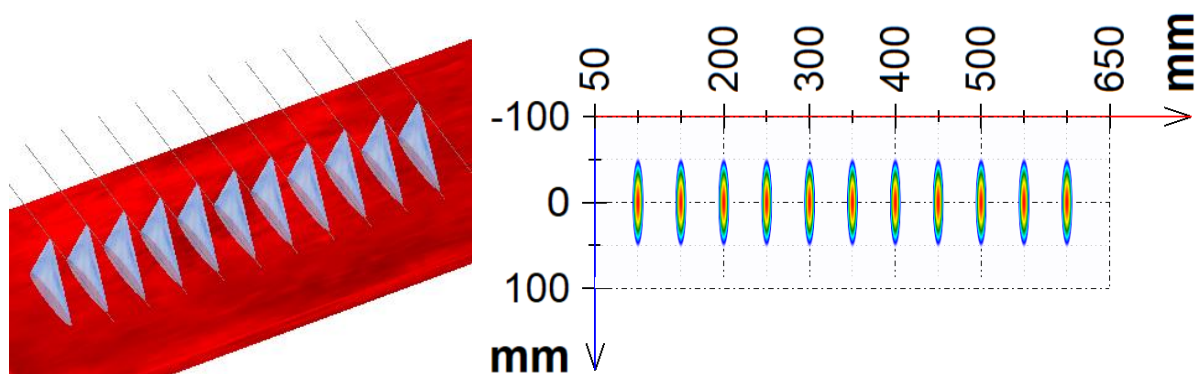


**Obr. 52** Teplotní režimy pro Vzorek 1 a 2



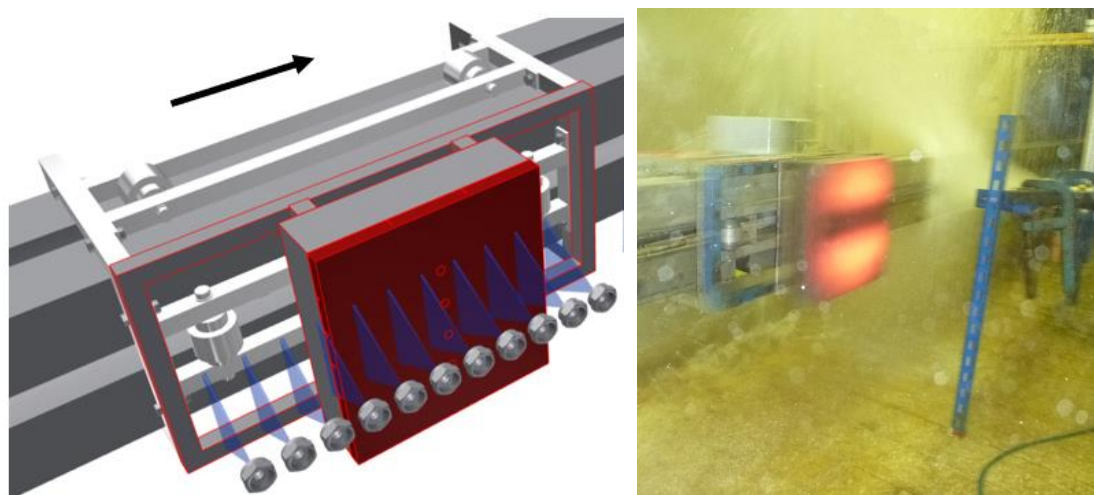
**Obr. 53** Porovnání naměřených tvrdostí pro oba zakalené vzorky a nezakalený (originální) materiál

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. První návrh chlazení je vytvořen pomocí programu vyvinutého v Laboratoři přenosu tepla a proudění (SimSpray). Tento program je schopný vizualizovat chladicí sekci a spočítat teoretické rozložení vody na povrchu desky (Obr. 54).



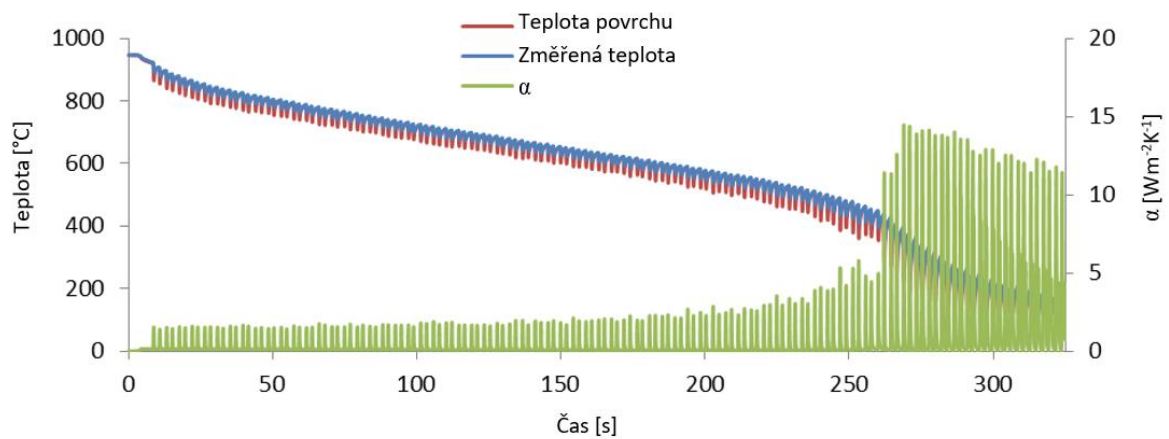
**Obr. 54** Ukázka z návrhu chladicí sekce pomocí programu SimSpray (vlevo), teoretické rozložení vody na povrchu desky (vpravo)

Dále je vytvořen jednoduše nastavitelný systém chlazení (Obr. 55), ve kterém je možné měnit vzdálenosti trysek, úhly natočení, velikosti trysek apod. Ten je namontován ve většině případů na lineární stand (Obr. 49 vlevo). Vertikální stand (Obr. 49 vpravo) se používá pouze v případě chlazení tenkých plechů, které se pohybují vertikálně. Naměřená data jsou opět vstupem do výpočtu inverzní úlohy, jež vypočítá povrchovou teplotu a součinitel přestupu tepla. Ukázka změřených, vypočtených povrchových teplot a součinitele přestupu tepla je zobrazena na Obr. 56. Získané závislosti součinitele přestupu tepla na povrchové teplotě a pozici v kalici sekci, pro různé konfigurace, jsou použity jako okrajové podmínky pro simulace reálné chladicí sekce. Ukázka okrajové podmínky společně s vypočítanými teplotami reálného provalku v chladicí sekci je zobrazena na Obr. 57.

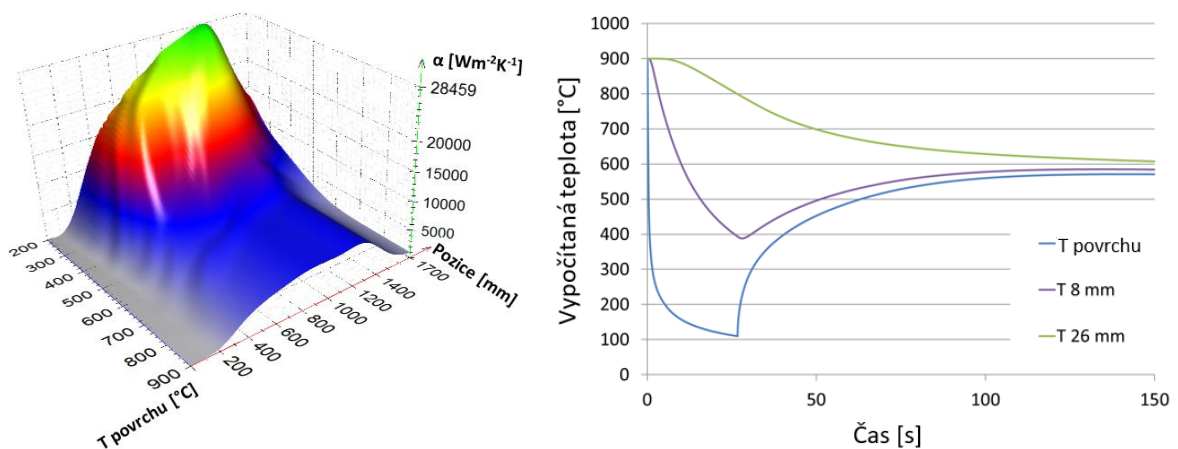


**Obr. 55** Schéma Průjezdu experimentální desky skrz chlazení (vlevo) a ukázka z experimentu (vpravo)



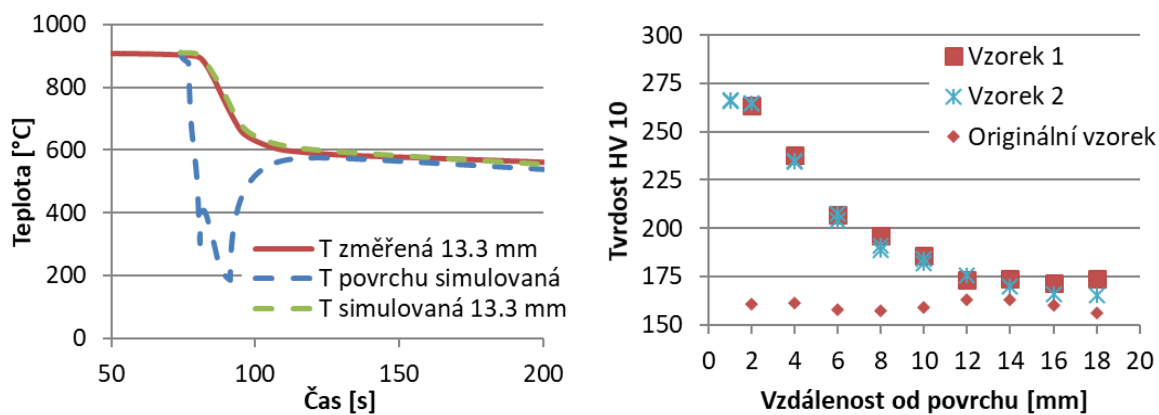


**Obr. 56** Ukázka změřených a vypočtených dat z experimentů provedených na Lineárním zařízení, publikováno v [17]

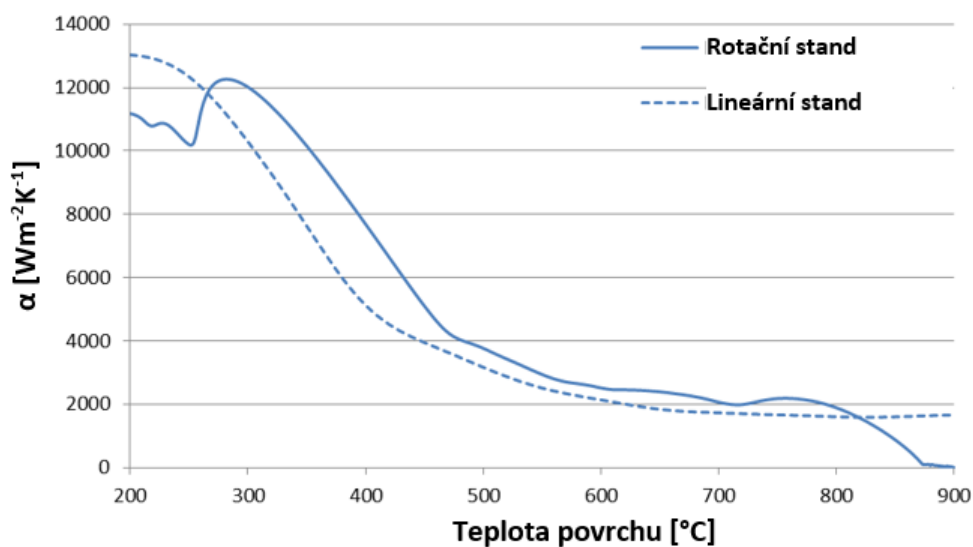


**Obr. 57** Ukázka závislosti součinitele přestupu tepla na teplotě povrchu a pozici v chladicí sekci ve směru pohybu experimentální desky (vlevo) a příklad simulace chlazení pro reálnou chladicí sekci, tloušťku provalku a materiál, publikováno v [18]

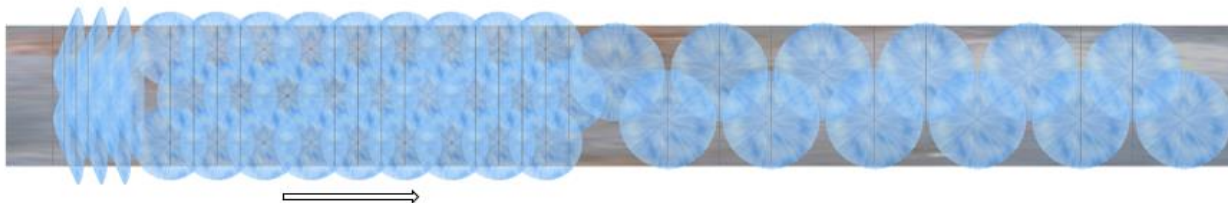
Jakmile simulace potvrdí správnou funkčnost návrhu chladicí sekce, je nutné ji před průmyslovým nasazením verifikovat. Bohužel v laboratorních podmínkách není možné postavit reálnou chladicí sekci vzhledem k jejím rozměrům. Proto je použito experimentální zařízení pro simulaci nekonečně dlouhých sekcí (Obr. 50). Lineární pohyb vzorku je zde převeden do rotace. Na základě simulace je určen čas, který musí reálný vzorek strávit v oblasti intenzivního a jemného chlazení. Ukázka změřené a simulované teploty pro první vzorek je zobrazena na Obr. 58 (nalevo). Ukázka porovnání okrajové podmínky získané z lineárního a rotačního standu je zobrazena na Obr. 54. Profil tvrdosti tohoto, a ještě jedno vzorku je zobrazen na Obr. 58 (napravo). 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. 60).



**Obr. 58** 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]

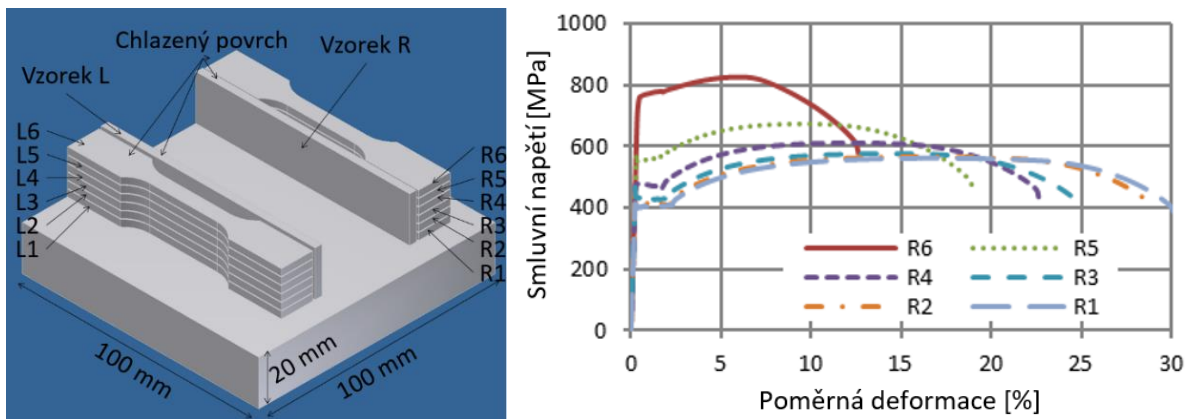


**Obr. 59** Porovnání naměřené okrajové podmínky z lineárního a rotačního standu



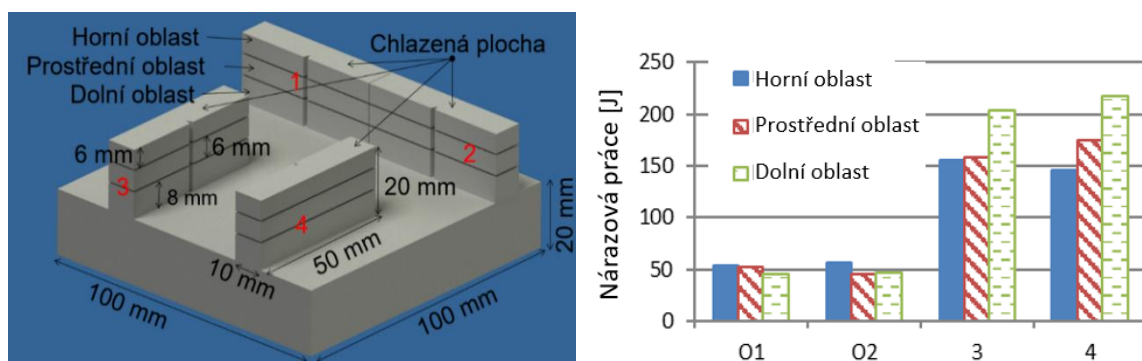
**Obr. 60** Ukázka navržené části chladicí sekce pro tepelné zpracování H-profilu

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. 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. 61 vlevo). Z každé vrstvy byl vyřezán vzorek pro tahovou zkoušku („psí kost“). Tepelné zpracování způsobilo nárůst meze kluzu z 355 MPa až na hodnotu 400 MPa (Obr. 61 vpravo).



**Obr. 61** Schéma výroby vzorků pro tahovou zkoušku tepelně zpracovaného materiálu (nalevo), výsledky tahových zkoušek (napravo), publikováno v [18]

Dále byly odebrány a vyrobeny vzorky pro zkoušky vrubové houževnatosti – Charpy test (Obr. 62 vlevo) za teploty vzorků  $-20^{\circ}\text{C}$ . Během těchto testů se ukázalo, že pro tepelně zpracované vzorky byla nárazová práce třikrát vyšší (vzorek 3 a 4) než v případě původního (originálního O1 a O2) materiálu (Obr. 62 vpravo). Všechny tyto testy byly provedeny podle příslušných norem ČSN EN ISO 6892-1 a ČSN EN ISO 148-1.



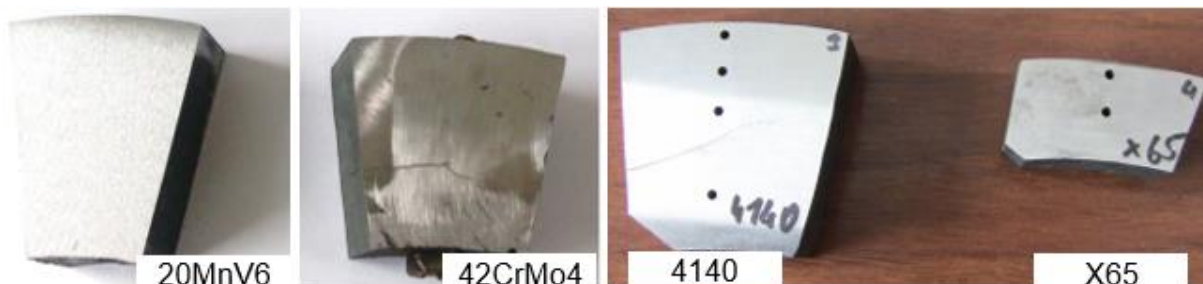
**Obr. 62** Schéma výroby vzorků pro Charpyho test tepelně zpracovaného materiálu (nalevo), výsledky testů (napravo) – O originální nechlazené vzorky, 3 a 4 jsou tepelně zpracované vzorky, publikováno v [18]

Výše publikované výsledky výzkumu tepelného zpracování H-profilu byly použity pro návrh chladicího systému, jenž byl vyroben a instalován v ocelárně v Turecku. V rámci tohoto výzkumu jsem vedl celý projekt a podílel jsem se ne něm včetně experimentální činnosti, vyhodnocování a prezentaci dosažených výsledků.

#### 4.5 VÝVOJ ZAŘÍZENÍ PRO TEPELNÉ ZPRACOVÁNÍ TRUBEK

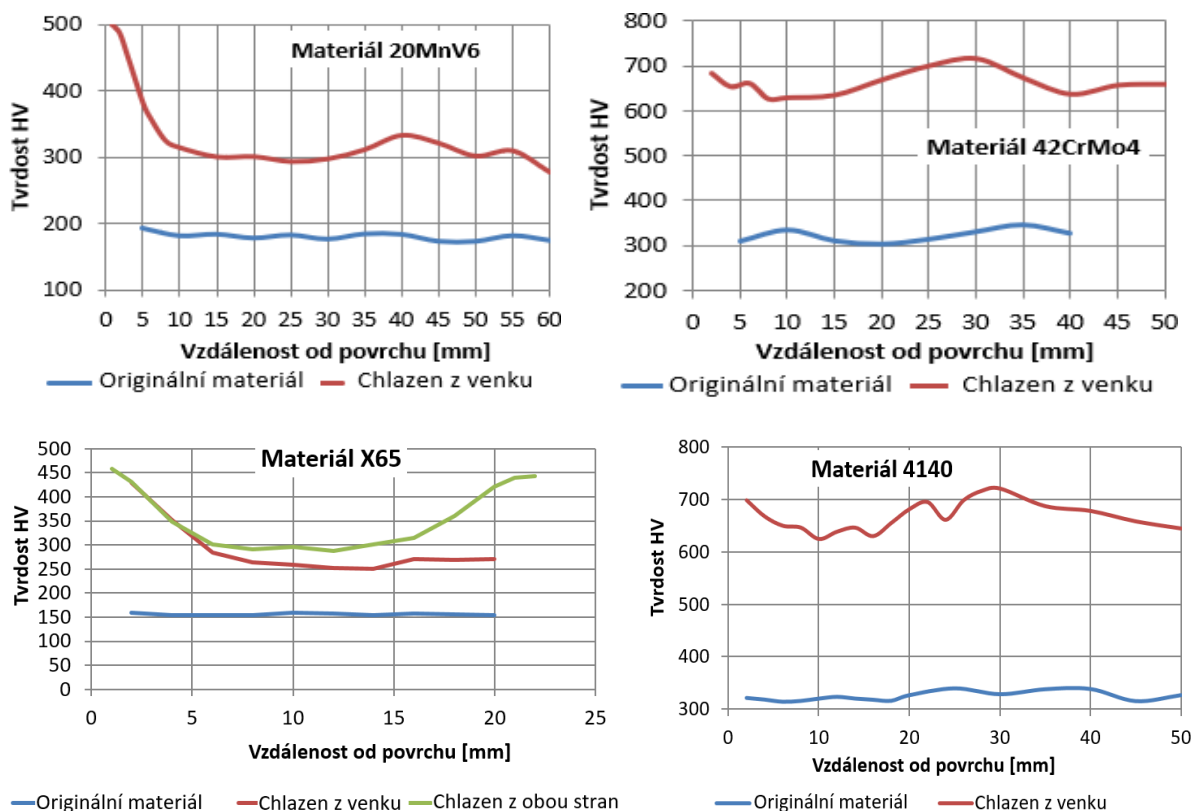
V rámci spolupráce s Třineckými železárnami a.s., ITA s.r.o a BKB Metal a.s. byl navržen, vyroben a instalován funkční prototyp chladicího zařízení bezešvých ocelových trubek pro OCTG (Oil Country Tubular Goods), či energetický průmysl. Výsledky z tohoto výzkumu byly publikovány v [19] a [20]. Výrobní program trubek v Třineckých železárnách je široký jak z hlediska chemického složení ocelí, tak i z rozměrového hlediska s průměry trubek v rozmezí 168 – 406 mm a tloušťek stěn 6,3 – 60,5 mm. Tato variabilita klade zvýšené nároky na proces chlazení, který zajistí tepelné zpracování trubek s minimálním rozsahem tvrdosti napříč tloušťkou stěny (maximálně 3 – 5 HRC).

Metodika výzkumu uvedená v 4.4 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 (Obr. 63). Tyto vzorky byly ohřáty na teploty vyšší než 930 °C s výdrží nejméně 10 minut. Poté byly zchlazeny jak z jedné strany, tak i z obou stran vzorku. Pro testy prokalitelnosti byla vybrána tryska se součinitelem přestupu tepla 35 000 Wm<sup>-2</sup>K<sup>-1</sup>.



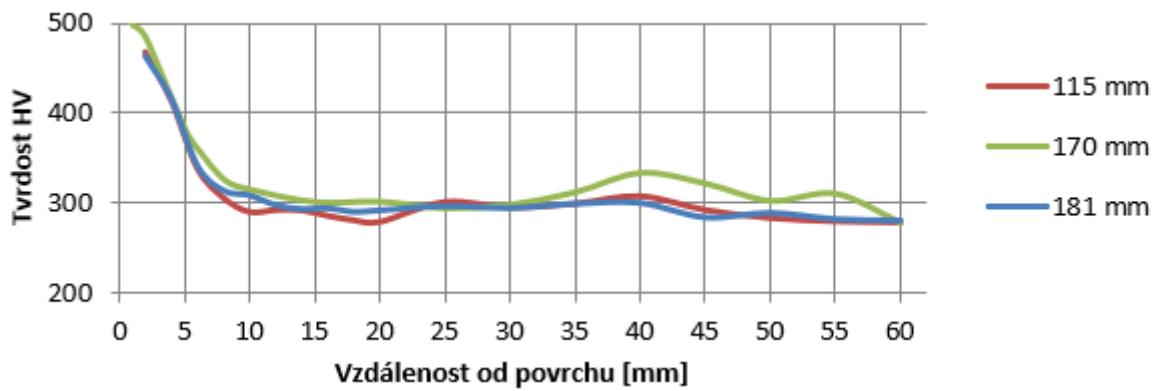
**Obr. 63** Vzorky po testech prokalitelnosti, publikováno v [19]

Příklady výsledných tvrdostí po zkoušce prokalitelnosti jsou uvedeny na Obr. 64. U materiálu 4140 a 42CrMo4 došlo ke zvýšení tvrdosti po celé tloušťce vzorku. Naopak u materiálů 20MnV6 a x65Q byla tvrdost zvýšena nerovnoměrně po tloušťce vzorku.



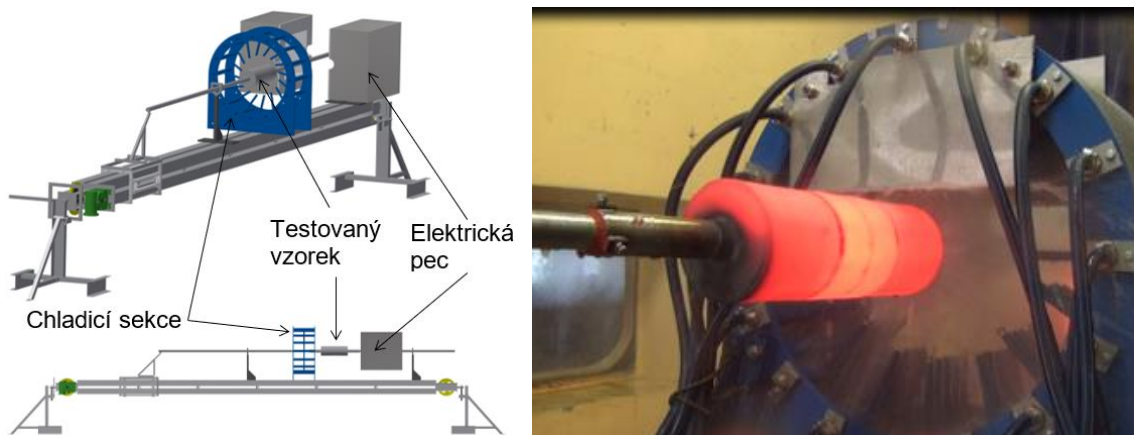
**Obr. 64** Výsledná tvrdost po testech prokalitelnosti. Ostřík byl proveden z venkovní strany vzorku (trubky) a i z vnitřní (pro X65) publikováno v [19]

Dále byl zkoumán vliv vzdálenosti ostříku od chlazeného povrchu na tvrdost trubky (při zkoušce prokalitelnosti). Materiál 20MnV6 byl vybrán pro tyto testy. Výsledky (Obr. 65) ukázaly, že vzdálenost trysky od povrchu vzorku mezi 115 mm a 181 mm nemá vliv na výslednou tvrdost.

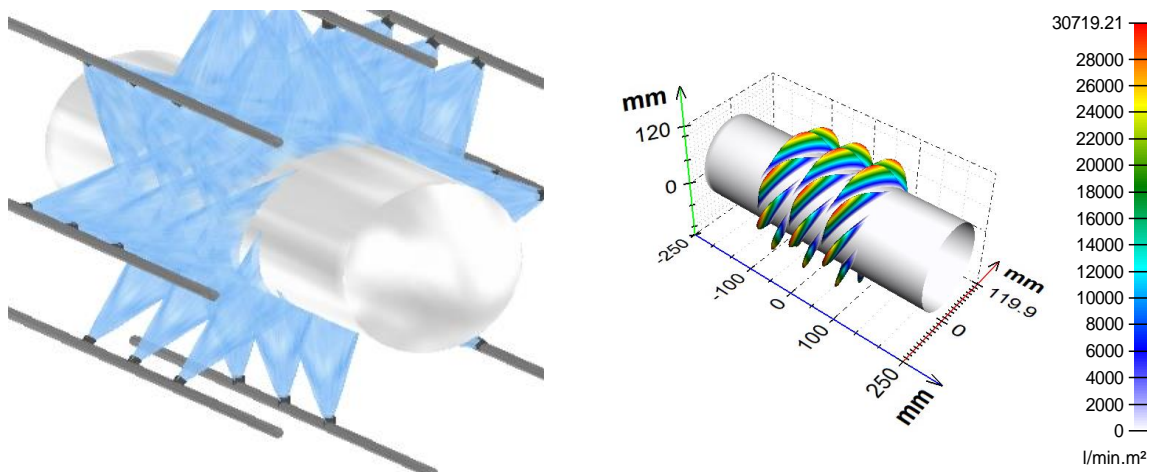


**Obr. 65** Vliv vzdálenosti ostřiku na výslednou tvrdost materiálu 20MnV6, publikováno v [19]

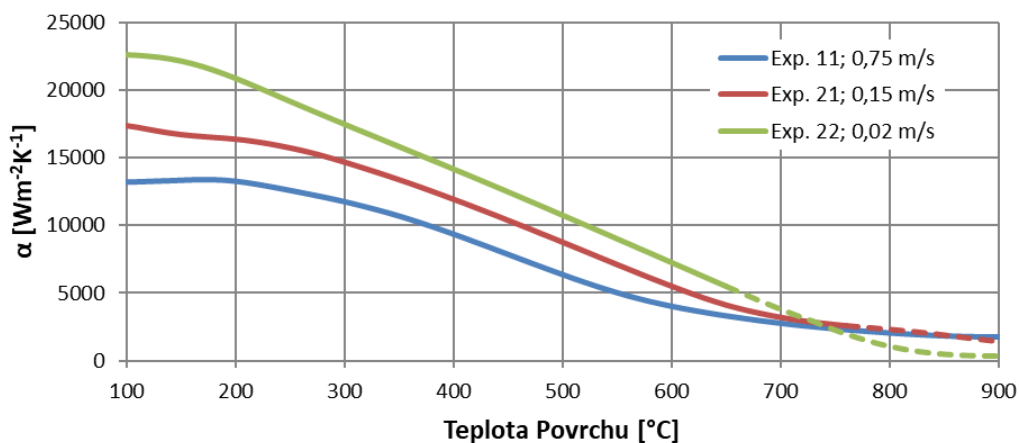
Dalším krokem byly laboratorní testy pro studium parametrů ovlivňujících intenzitu chlazení. Pro tyto testy byl použit lineární stand (Obr. 49 vlevo, Obr. 66). Vizualizace jednoho z chladicích systémů je uvedena na Obr. 67. Běžně studovanými parametry jsou: tlak/průtok vody, typ trysky, úhel natožení trysek, rychlost posuvu atd. Při těchto testech je zároveň studována homogenita chlazení. Nehomogenní chlazení může vést k heterogenním mechanickým vlastnostem a deformacím trubky [21]. Zajímavým výsledkem byl vliv rychlosti posuvu na velikost součinitele přestupu tepla. S klesající rychlostí se zvyšovala velikost součinitele přestupu tepla (Obr. 68).



**Obr. 66** Experimentální zařízení pro testování intenzit chlazení na trubkách

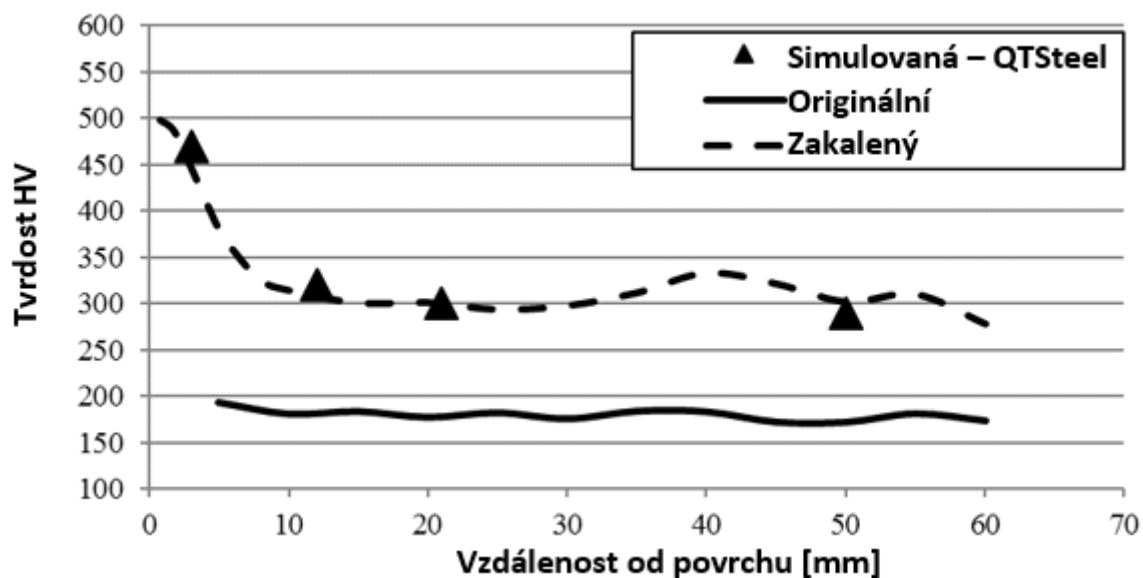


**Obr. 67** Vizualizace jedné ze zkoumaných variant chlazení trubek



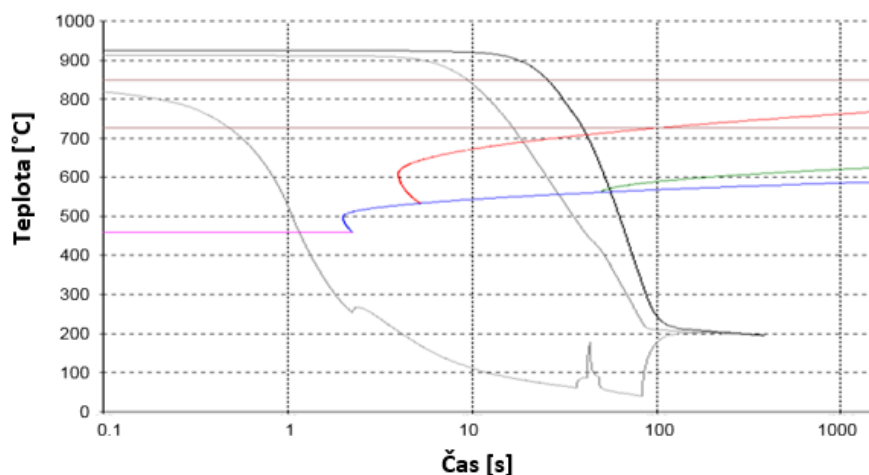
**Obr. 68** Vliv rychlosti na velikost součinitele přestupu tepla, publikováno v [20]

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. K ověření těchto simulací byly použity výsledky z Jominiho zkoušek prokalitelnosti. Naměřené chladicí intenzity byly nahrány do softwaru QT steel. Porovnání vypočtených se změřenými tvrdostmi je, pro vzorek 20MnV6, uvedeno na Obr. 69.



**Obr. 69** Porovnání predikované tvrdosti na základě simulací s výsledky tvrdostí z Jominiho zkoušek, publikováno v [20]

Software QTSteel byl použit pro modelování chladicího výkonu pro trubky daných rozměrů a stupňů za účelem zjištění počtu délkou chlazení a přepravních rychlostí. Ukázka výpočtu v ARA diagramu pro materiál 20MnV6 (229 x 36 mm) a přepravní rychlost  $30 \text{ mms}^{-1}$  je uveden na Obr. 70. Prototyp chladicí sekce je zobrazen na Obr. 71.



**Obr. 70** Ukázka chladicích křivek vnější a vnitřní stěny trubky a středu trubky v ARA diagramu

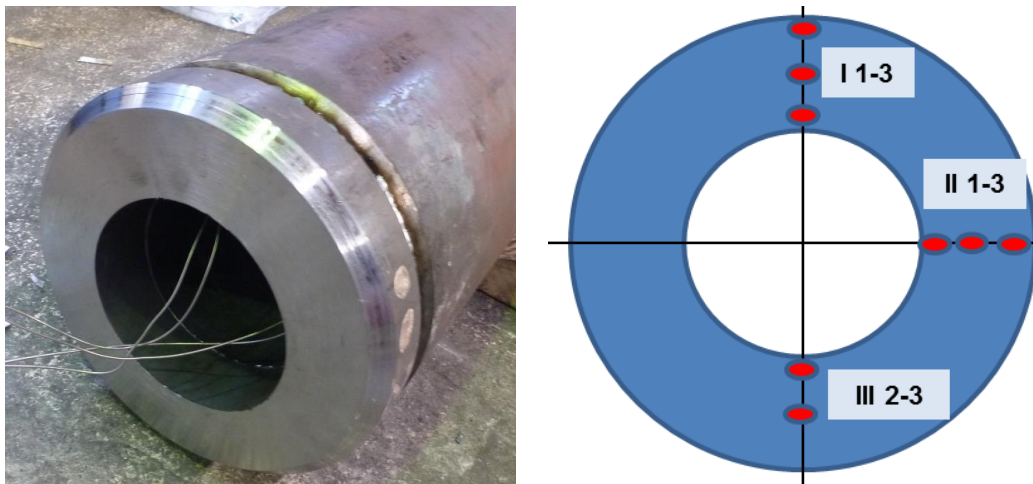


**Obr. 71** Chladicí sekce umístěná za tunelovou pecí v Třineckých železárnách

V rámci projektu vývoje chlazení trubek jsem se podílel na experimentální činnosti a vyhodnocování výsledků.

Tento projekt dále pokračoval testováním chlazení v reálných podmínkách v rámci dotačního projektu Trio. V tomto případě jsem měl na starosti měření v Třineckých železárnách, vyhodnocování a prezentaci výsledků.

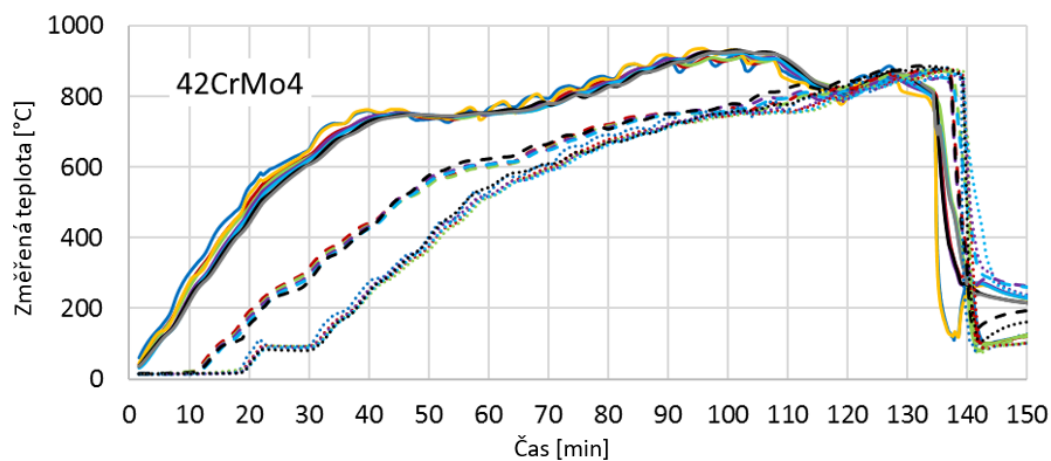
Do reálných trubek byly navařeny tři prstence se zabudovanými termočlánky po obvodu (Obr. 72). První prstenec byl umístěn na začátku trubky, druhý prstenec uprostřed trubky a třetí prstenec byl umístěn na konci trubky (Obr. 73 vlevo). Následně byly termočlánky připojeny do speciálního dataloggeru, který byl ukryt v chráněném termoizolačním boxu navrženém v Laboratoři přenosu tepla a proudění. Tento kryt byl přivařen na konec trubky (Obr. 73 vpravo). Trubky s dataloggerem posléze projely tunelovou pecí a chladicím systémem. Třineckým železárnám byly předány průběhy změřených teplot – ukázka průběhů teplot z jednoho měření v provozních podmínkách je zobrazena na Obr. 74. Tato měření byla prováděna pro ověření chladicích intenzit a homogenity chlazení. Výsledky z těchto měření pomohly optimalizovat potřebný tlak vody pro chlazení a rychlost posuvu trubky.



**Obr. 72** Navařený prstenec s termočlánky na trubce (vlevo) a schéma pozice termočlánků v prstenci (vpravo)



**Obr. 73** Trubky osazené termočlánky a nachystané pro připojení dataloggeru (vlevo) a kryt dataloggeru (umístěný na konci trubky) vjíždí do tunelové pece (vpravo), publikováno v [20]

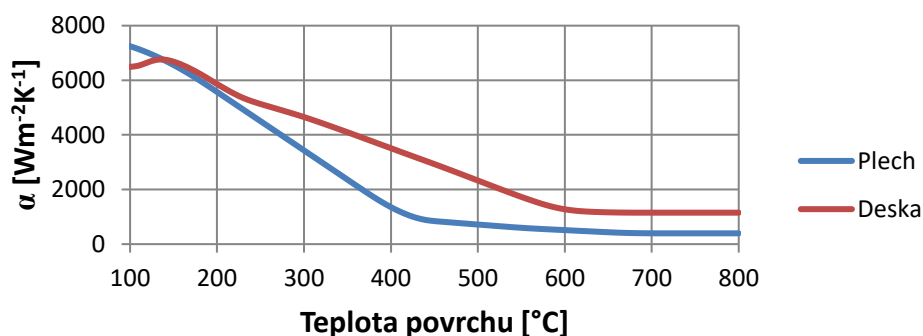


**Obr. 74** Změřené teploty v různých pozicích na trubce z materiálu 42CrMo4, publikováno v [20]



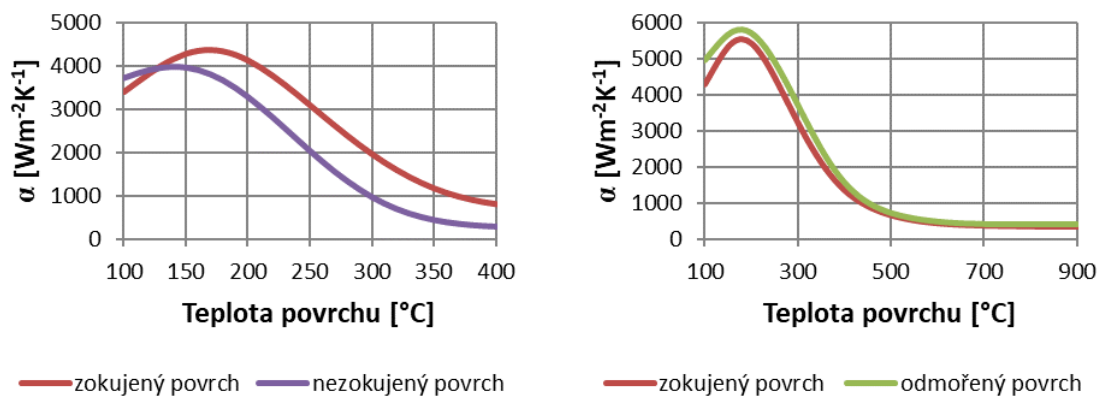
#### 4.6 VLIV OXIDICKÝCH VRSTEV NA VELIKOST SOUČINITELE PŘESTUPU TEPLA PŘI TEPELNÉM ZPRACOVÁNÍ

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. Nejprve byly tyto testy prováděny na standardních austenitických deskách, které měly tloušťku 25 mm. Později se ukázalo, že získaná data včetně simulací nesouhlasí dostatečně přesně daty z reálného provozu. Příčinou byly oxidické vrstvy a drsnost válcovaného povrchu na tlusté experimentální desce. Ukázalo se, že oxidické vrstvy mohou zvyšovat intenzitu chlazení, což bylo popsáno v disertační práci autora [3] a v [23] - [24]. Na Obr. 75 je vidět rozdíl ve velikosti součinitele přestupu tepla v závislosti na teplotě povrchu pro tenký plech (1.5 mm) a tlustou desku (25 mm).

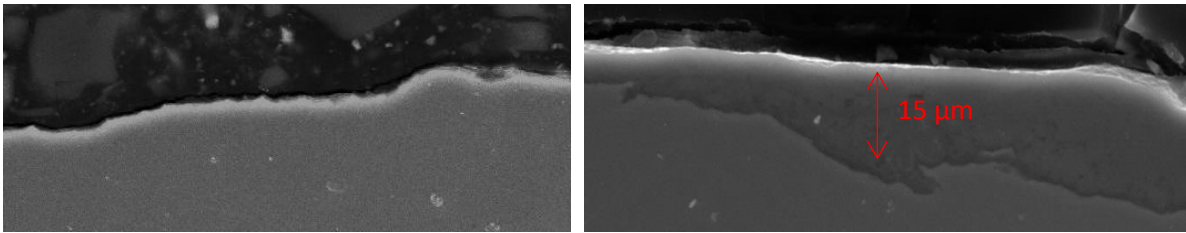


**Obr. 75** Rozdíl součinitele přestupu tepla pro tenký a tlustý plech (desku), publikováno v [3]

Bylo zjištěno, že rychlost ohřevu a inertní atmosféra v peci má zásadní vliv na velikost oxidických vrstev na povrchu vzorku při zachování stejné koncové teploty. Proto byly provedeny další testy z vyšších a nižších teplot s tlustou deskou (25 mm, žáruvzdorná nerezová ocel 1.4828). Nejprve byly povrchy ponechány na vysoké teplotě a zokujeny. Byly provedeny experimentální měření ze dvou startovacích teplot 400 a 900°C. Poté byly oxidy z povrchu odstraněny pomocí moření. Následně byly testy opakovány, nejprve z počáteční teploty 400°C a po té 900°C. Při porovnání se ukázalo, že součinitel přestupu tepla byl rozdílný pouze pro testy se startovací teplotou 400°C. Ve druhé případě byly výsledky porovnatelné (Obr. 76). Při následné analýze na elektronovém mikroskopu bylo zjištěno, že se nepodařilo ochránit povrch desky před zoxidováním během ohřevu na 900 °C (Obr. 77).

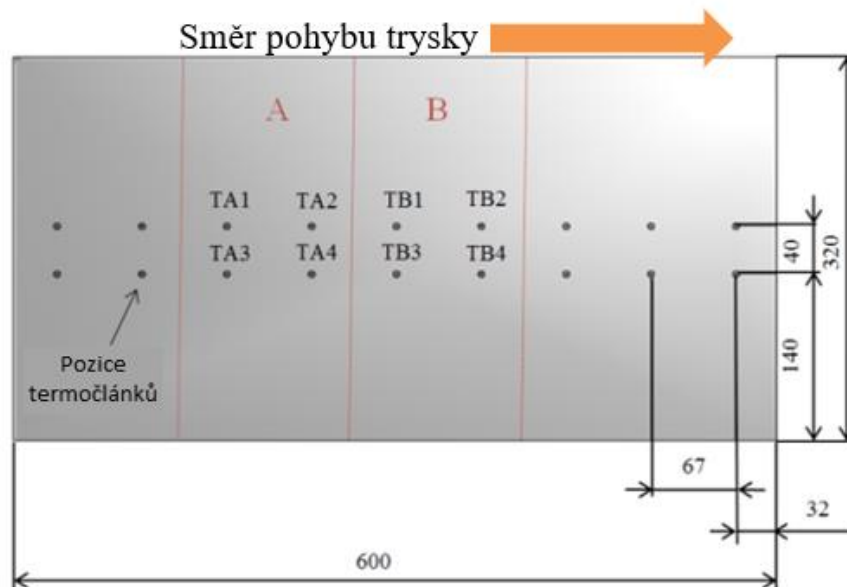


**Obr. 76** Vliv oxidických vrstev na velikost součinitele přestupu tepla, publikováno v [3]



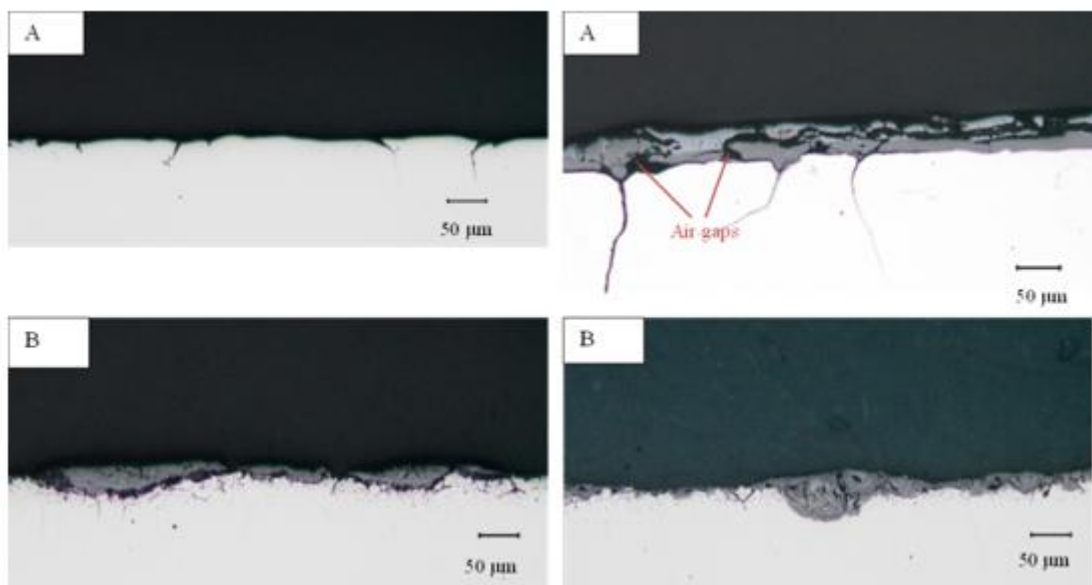
**Obr. 77** Odmořený povrch - vlevo, v průměru 15 μm vrstva oxidů železa na povrchu – vpravo (tmavé oblasti představují zalévací hmotu, která stabilizuje oxidy při přípravě vzorku, šedý je povrch oceli a oxidy mají na snímku tmavší šedou barvu)

Na základě těchto dat byla provedena další experimentální analýza, kdy byla část zokuzené austenitické experimentální desky (materiál 1.4828, 25 mm tloušťka) odmořena (Obr. 78 oblast A). Vzorky povrchů v sekcích A a B byly před a po experimentu odebrány a podrobeny analýze na elektronovém mikroskopu (Obr. 79). Deska byla osazena termočlánky ve vzdálenosti 2 mm od povrchu. Dále byla ohřata na počáteční teplotu 1000°C. Poté se pod deskou pohybovala trojice trysek, ze kterých stříkala na povrch desky voda pouze v kladném směru pohybu, dokud nebyl povrch desky na teplotě nižší než 100°C. Už při prvním průjezdu trysek pod deskou byl evidentní vliv různých oxidických vrstev na intenzitu chlazení. Na Obr. 80 je vidět rozdíl v povrchové teplotě v oblasti A a B. Příklad změřených a vypočtených povrchových teplot z tohoto experimentu je zobrazen na Obr. 81. Porovnáním teplot bylo potvrzeno, že oblast A (s vyšší oxidickou vrstvou a porozitou oxidu) byla chlazená s vyšší intenzitou než oblast B. Bylo to způsobeno právě posunem Leidenfrostovy teploty (Obr. 82).



**Obr. 78** Schéma experimentální desky s pozicemi termočlánků a vyznačenými oblastmi A a B. Oblast A byla odmořena a oblast B byla ponechána, publikováno v [23]

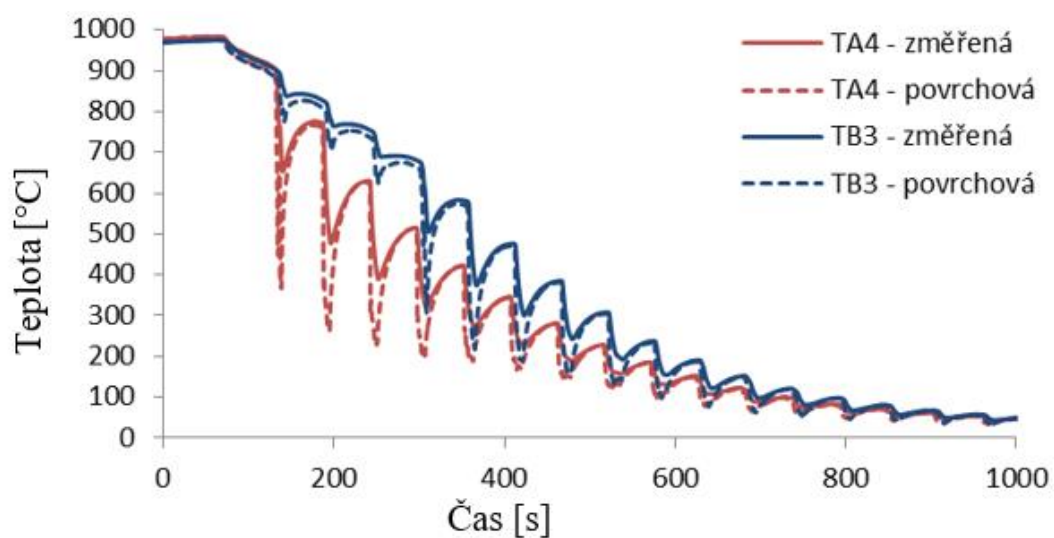
Vzorky povrchů v sekcích A a B byly před a po experimentu odebrány a podrobeny analýze na elektronovém mikroskopu.



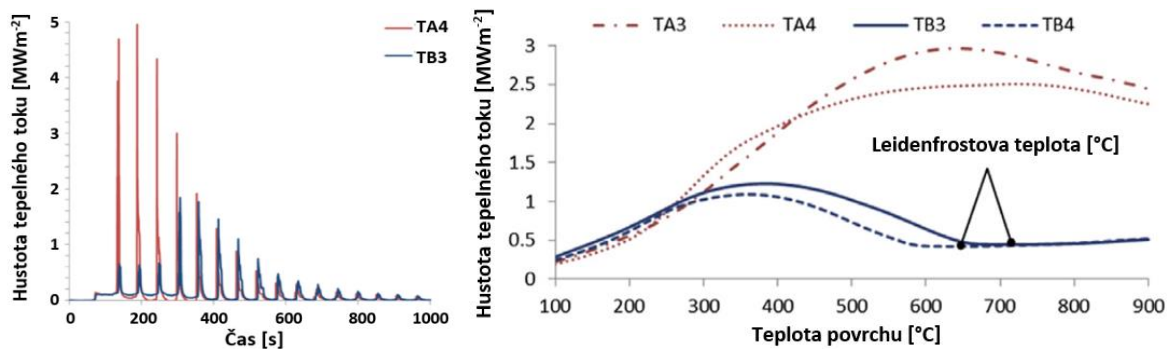
**Obr. 79** Elektronové snímky povrchů oxidických vrstev v oblastech A (odmořené) a B (neodmořené), před experimentem v levém sloupci a po experimentu v pravém sloupci, světle šedá barva představuje ocel a tmavší šedá barva reprezentuje oxid, publikováno v [23]



**Obr. 80** Schéma pozice trysek (vlevo) a povrch desky během prvního průjezdu trysek pod deskou, publikováno v [23]

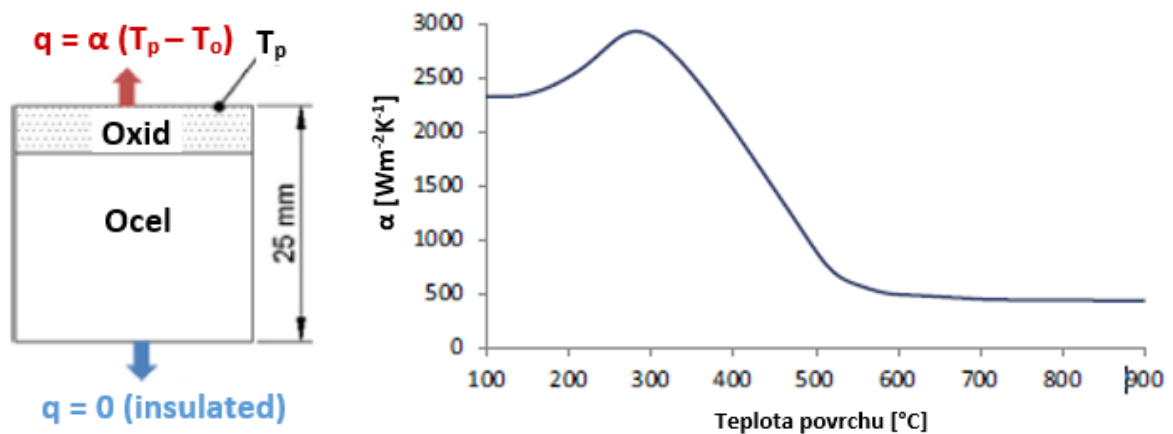


**Obr. 81** Vývoj povrchových teplot pro teplotní senzory v oblasti A a B, publikováno v [23]



**Obr. 82** Hustota tepelného toku v závislosti na čase (vlevo) a na teplotě povrchu (vpravo), publikováno v [23]

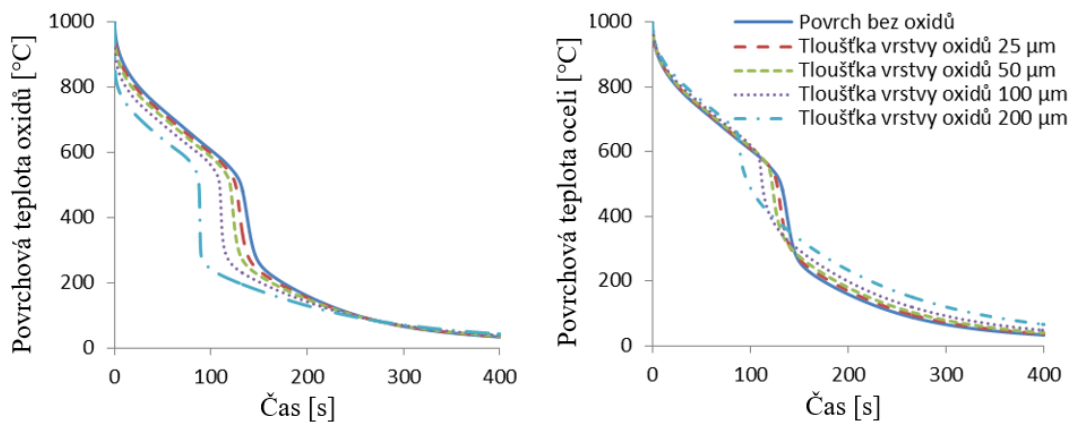
Simulace chlazení, provedené v [23] a [24] ukázaly vliv Oxidických vrstev na povrchovou teplotu oxidu a oceli pro různé oxidické tloušťky. Na Obr. 83 je uvedeno jednoduché schéma simulace chlazení přes vrstvu oxidu (vlevo) a okrajová podmínka v podobě závislosti součinitele přestupu tepla na povrchové teplotě, který byl pro všechny simulace stejný. Termofyzikální vlastnosti použité v modelu jsou specifikovány v Tab. 7. Výsledky těchto simulací jsou zobrazeny na Obr. 84.



**Obr. 83** Schéma numerického modelu (vlevo) a použitá okrajová podmínka (vpravo), publikováno v [23]

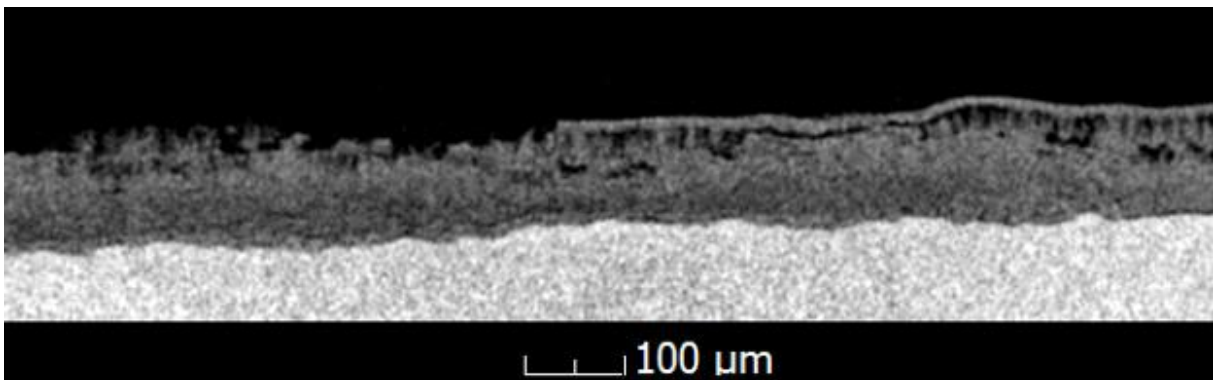
**Tab. 7** Termofyzikální vlastnosti použité při simulaci [23]

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



**Obr. 84** Porovnání simulovaných povrchových teplot oxidů a oceli (pod oxidem) pro různé tloušťky oxidických vrstev, publikováno v [23] a [24]

Ve studiu oxidických vrstev a jejich vlivu na intenzitu chlazení pokračuje úspěšně Martin Chabičovský, který dává do souvislosti změnu drsnosti povrchu vlivem vzniku oxidických vrstev a vliv porozity oxidů na součinitel přestupu tepla. Poréznost oxidu je viditelná na řezu z tomografického snímku oxidické vrstvy (Obr. 85). V oblasti výzkumu oxidických vrstev se autor podílel na experimentální a vyhodnocovací činnosti. Simulace byly provedeny Martinem Chabičovským.

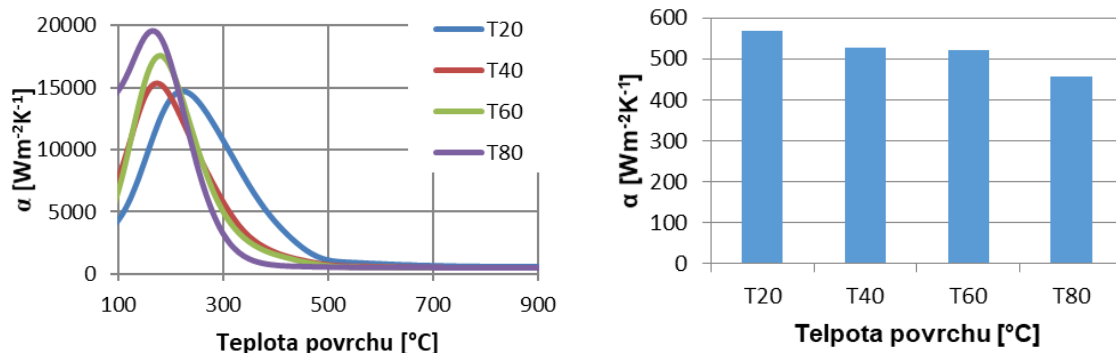


**Obr. 85** Tomografický snímek oxidické vrstvy na povrchu austenitické oceli 1.4828, bílá barva reprezentuje ocel a šedá barva oxid

#### 4.7 VLIV TEPLoty VODY NA INTENZITU CHLAZENÍ PŘI TEPELNÉM ZPRACOVÁNÍ

Tenké plechy se během tepelného zpracování mohou pohybovat jak horizontálně, tak i vertikálně. V této oblasti autor nejvíce spolupracoval se společností Fives Stein z Francie, která se zabývá dodáváním chladicích sekcí po celém světě. V rámci této spolupráce byla vyvinuta či charakterizována řada chladicích systémů, které byly dodávány do Číny, Ruska, USA, Jižní Koreji apod.

V rámci první spolupráce se společností Fives Stein byl zkoumán i vliv teploty vody na intenzitu chlazení pro běžné teploty při tepelném zpracování. Jak již bylo popsáno v kapitole 2.32, teplota vody zásadně ovlivňuje velikost Leidenfrostovy teploty. S rostoucí teplotou vody klesá skokově Leidenfrostova teplota. Tyto testy zároveň potvrdily, že intenzita chlazení klesá s rostoucí teplotou vody v teplotní oblasti nad Leidenfrostovou teplotou (Obr. 86). Číslo za písmenem T značí teplotu vody při experimentu (T20 – znamená experiment s teplotou vody 20 °C).



**Obr. 86** Vliv teploty vody na součinitel přestupu tepla pro celý zkoumaný teplotní interval (vlevo) a v teplotním intervalu nad Leidenfrostovou teplotou (vpravo), publikováno v [25]

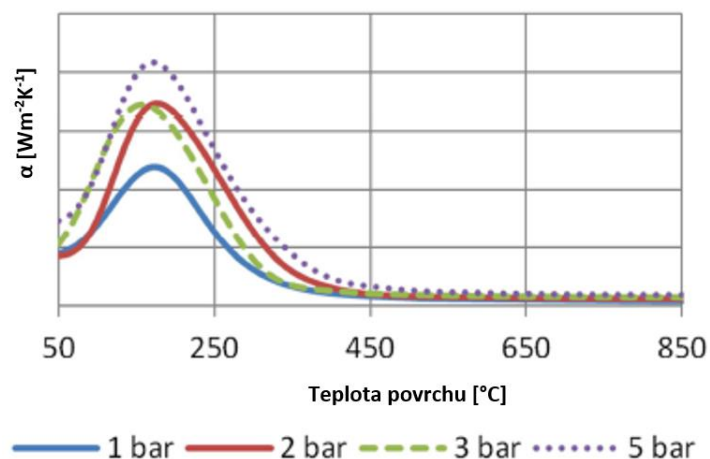
#### 4.8 VÝVOJ CHLADICÍCH SYSTÉMU PRO TEPELNÉ ZPRACOVÁNÍ HORIZONTÁLNĚ SE POHYBUJÍCÍCH PLECHŮ

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 Lineární stand (Obr. 49 vlevo). Jako experimentální vzorek byly použity austenitické tenké plechy o tloušťce 1,5 mm na jejichž zadní straně byly přivařeny termočlánkové dráty o průměru 0,2 mm (Obr. 87 vpravo). Ukázka laboratorní sekce je zobrazena na Obr. 87 (vlevo).

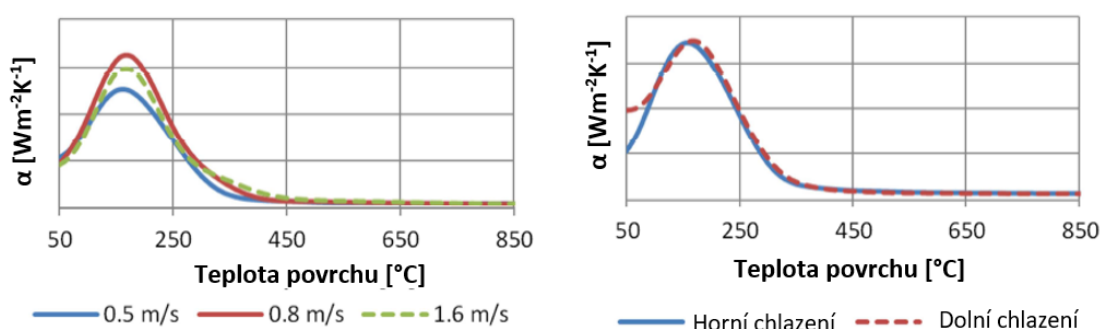


**Obr. 87** Ukázka laboratorní chladicí sekce (vlevo), přivařené termočlánky na zadní straně plechu (vpravo)

Byla provedena rozsáhlá studie parametrů ovlivňujících velikost součinitele přestupu tepla. Jedním z těchto parametrů byl tlak vody v rozmezí od 1 – 5 bar (Obr. 88). Dále byl studován například vliv rychlosti posuvu plechu či orientace chlazení (chlazení ze spodu a z vrchu). Výsledky jsou zobrazeny na Obr. 89.

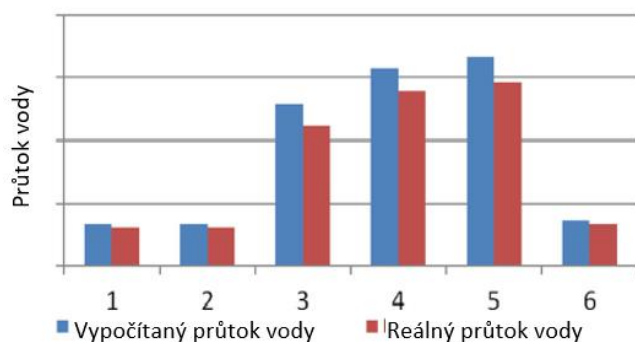


**Obr. 88** Vliv tlaku vody na velikost součinitele přestupu tepla, publikováno v [26]



**Obr. 89** Porovnání součinitele přestupu tepla pro různé rychlosti (vlevo) a orientaci chlazení (vpravo), publikováno v [26]

Na základě získaných experimentálních dat byla navrhována, 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. 90 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.



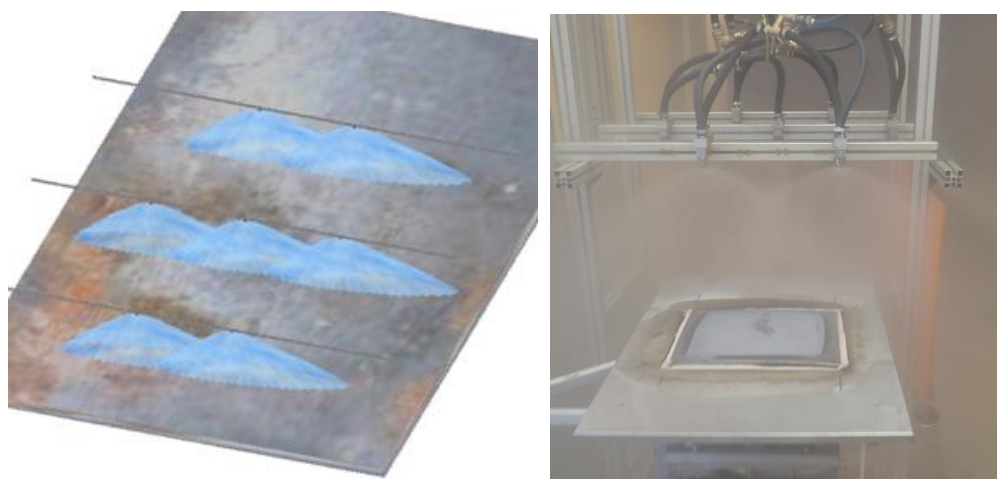
**Obr. 90** Porovnání predikovaných (vypočítaných) průtoků s reálnými pro 6 různých režimů chlazení (vlevo), rovinnost plechu po vyjetí z chladicí sekce (napravo), publikováno v [26]

Výsledky tohoto výzkumu byly publikovány v [25] a [26]. V této oblasti výzkumu se autor podílel na experimentální a vyhodnocovací činnosti včetně prezentaci výsledků.

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 (Obr. 91). Schéma laboratorní chladicí sekce je zobrazeno na Obr. 92. Pro tyto měření bylo použito zařízení Lineární stand (Obr. 49 vlevo). 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  $0,5 \text{ ms}^{-1}$ .



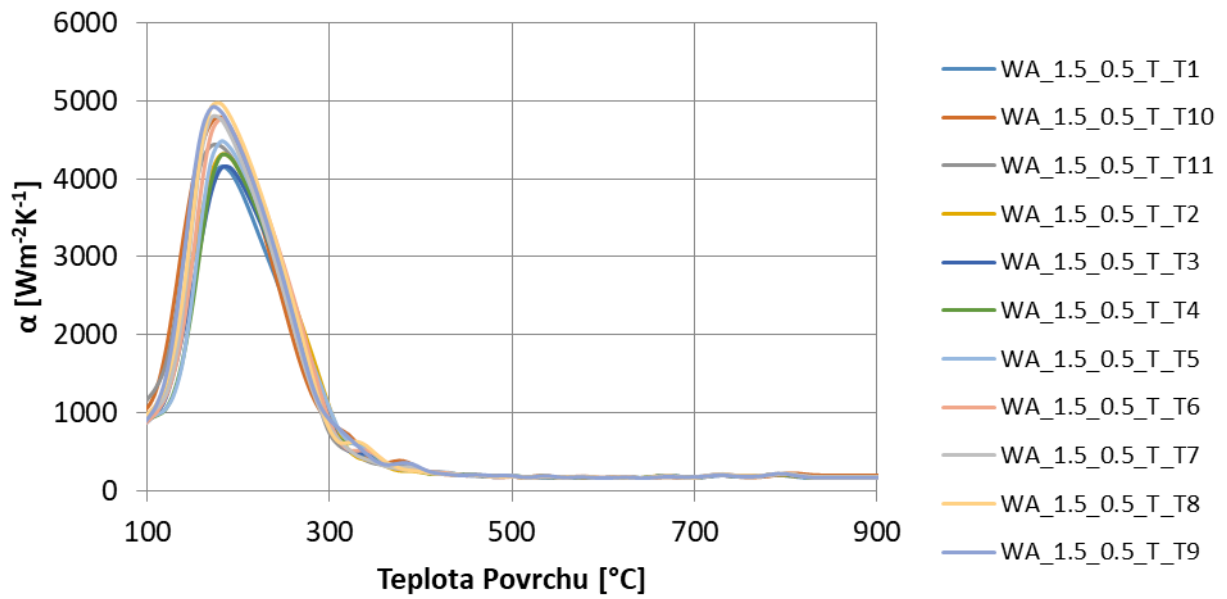
**Obr. 91** Tryska Lechler 148.528.17.56



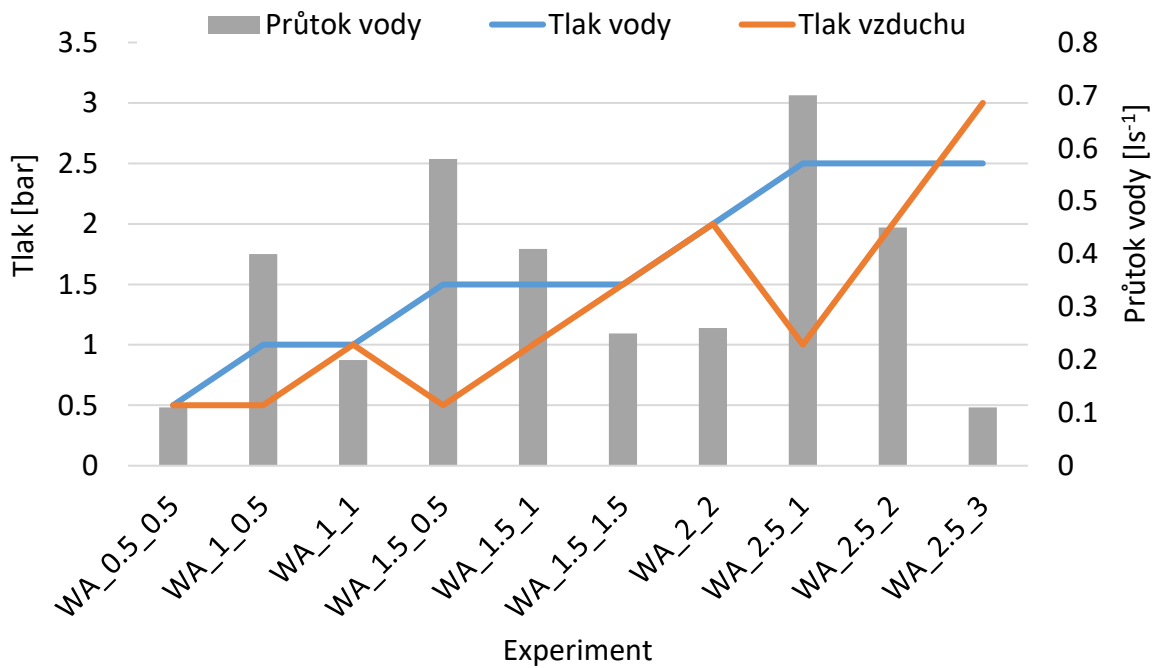
**Obr. 92** Schéma chladicí sekce složené z vodo-vzdušných trysek(vlevo) a experimentální plech vjíždí do chladicí sekce

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. Ukázka typické homogenity je zobrazena na Obr. 93. Na Obr. 94 je uveden změřený průtok vody pro různé kombinace tlaku vody a vzduchu. Výsledky z těchto experimentů byly velmi zajímavé. Například ukázaly, že se zvyšujícím se tlakem vody (konstantní tlak vzduchu) roste Leidenfrostova teplota (Obr. 95). 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. (Obr. 96) Poslední zajímavé porovnání je uvedeno na Obr. 97. Z těchto grafů 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. 94). Ovšem se zvyšujícím se průtokem vody, roste Leidenfrostova teplota (Obr. 97 vpravo)

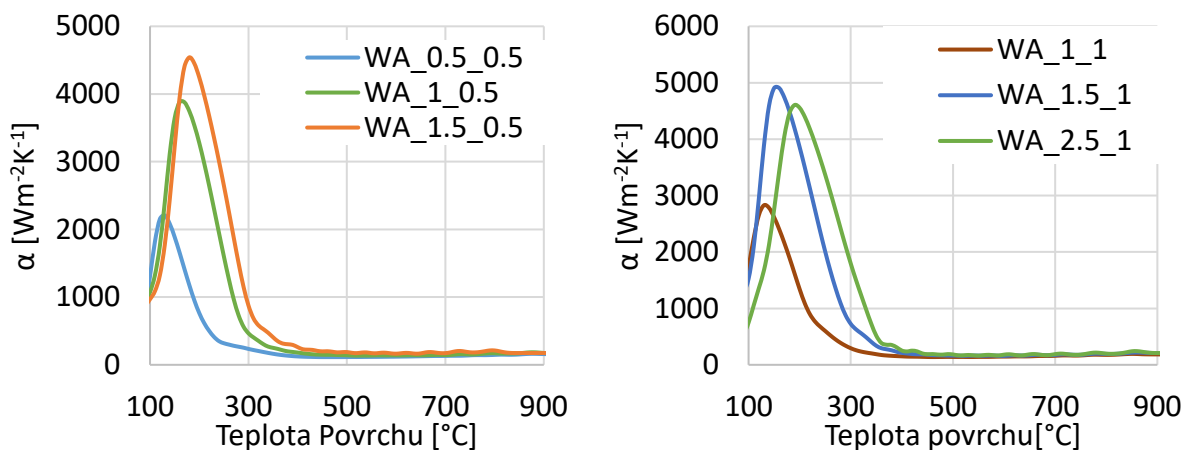




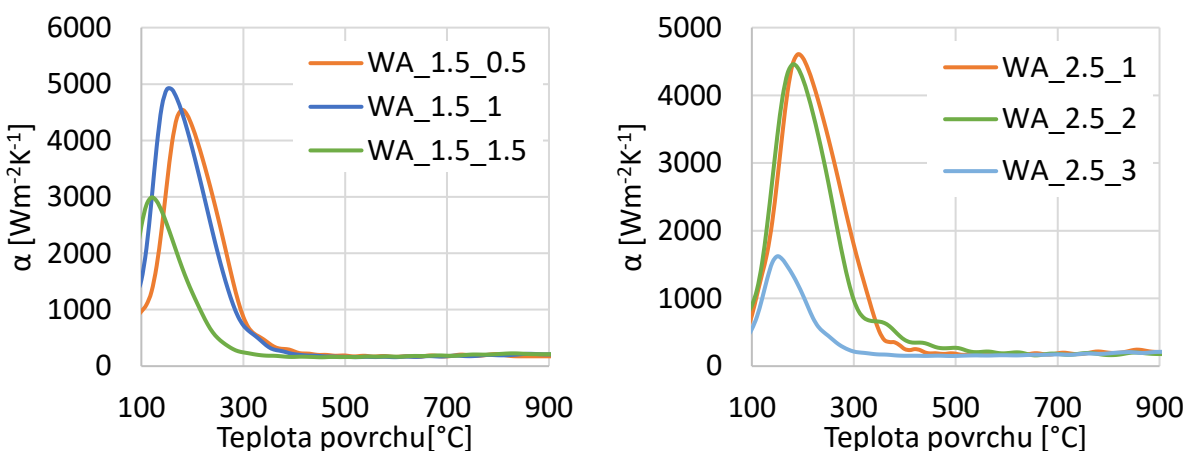
**Obr. 93** Součinitel přestupu tepla pro kombinaci tlaků: voda 1,5 bar a vzduch 0,5 bar. T1 – T10 symbolizují jednotlivé termočlánky umístěné v řadě kolmé na směr pohybu vzorku



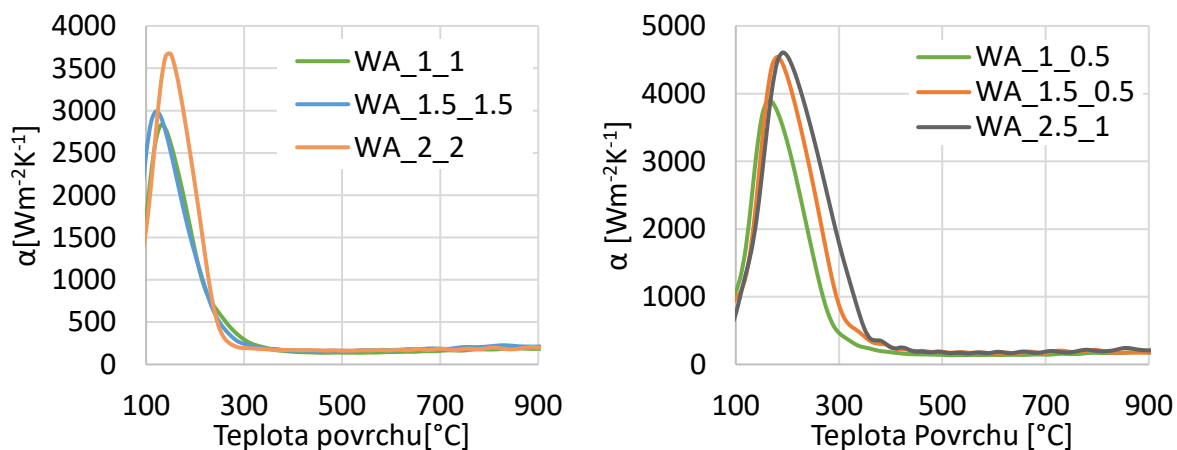
**Obr. 94** Závislost měřeného průtoku vody pro různé kombinace tlaku vzduchu a vody



**Obr. 95** Posun Leidenfrostovy teploty pro narůstající tlak vody 0,5 – 1 a 1 - 2,5 bar pro konstantní tlak vzduchu 0,5 a 1 bar



**Obr. 96** Vývoj součinitele přestupu tepla pro konstantní tlak vody 1,5 a 2,5 bar a zvyšující se tlak vzduchu 0,5 – 1,5 bar a 1 – 3 bar

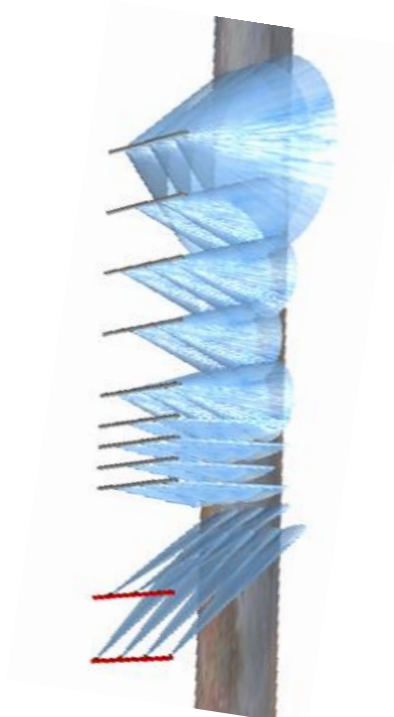


**Obr. 97** Porovnání velikostí součinitele přestupu tepla pro kombinace se stejnými tlaky vody a vzduchu (vlevo) a porovnání součinitele přestupu tepla pro zvyšující se průtoky vody (vpravo)

#### 4.9 VÝVOJ CHLADICÍCH SYSTÉMU PRO TEPELNÉ ZPRACOVÁNÍ VERTIKÁLNĚ SE POHYBUJÍCÍCH PLECHŮ

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 vertikálním stendu (Obr. 49 vpravo). V rámci této spolupráce bylo charakterizováno či vyvinuto nejméně pět dalších chladicích zařízení. Ve většině těchto projektů byl autor zodpovědný za vedení projektů a podílel se na experimentální, vyhodnocovací činnosti a prezentaci výsledků. Jako příklad spolupráce s Fives Stein mohou použít výzkum v oblasti tepelného zpracování plechů pro ArcelorMittal v USA, SSAB ve Švédsku, Hyundai steel v Jižní Koreji a Posco v Jižní Koreji, což jsou jejich obchodní partneři.

Velmi zajímavým projektem bylo vyvinout chladicí systém, který by umožnil homogenně zchladit 2 mm tenký plech s rychlostí ochlazování vyšší než  $1\,000\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{s}^{-1}$ . V tomto případě se plech pohyboval vertikálně od spodu nahoru. Opět byl pro tyto účely použit vertikální stand (Obr. 49 vpravo) s tím rozdílem, že pec byla umístěna pod chlazením. 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. 98 a Obr. 99.

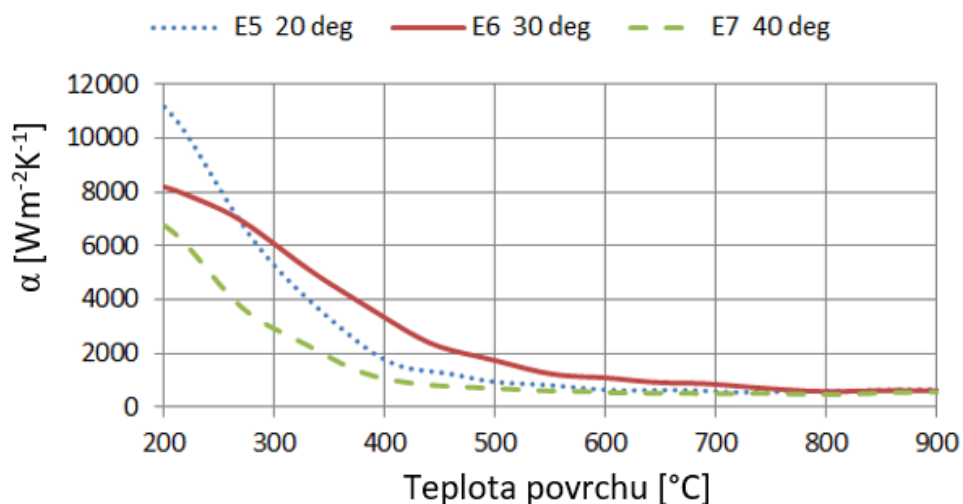


**Obr. 98** Příklad testované konfigurace, kde červené chladicí kolektory značí vodní nůž



**Obr. 99** Ukázka chladicí sekce při studených testech (vlevo), ukázka ze studeného testu (vpravo)

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 30° chladí nejintenzivněji (Obr. 100) [27].

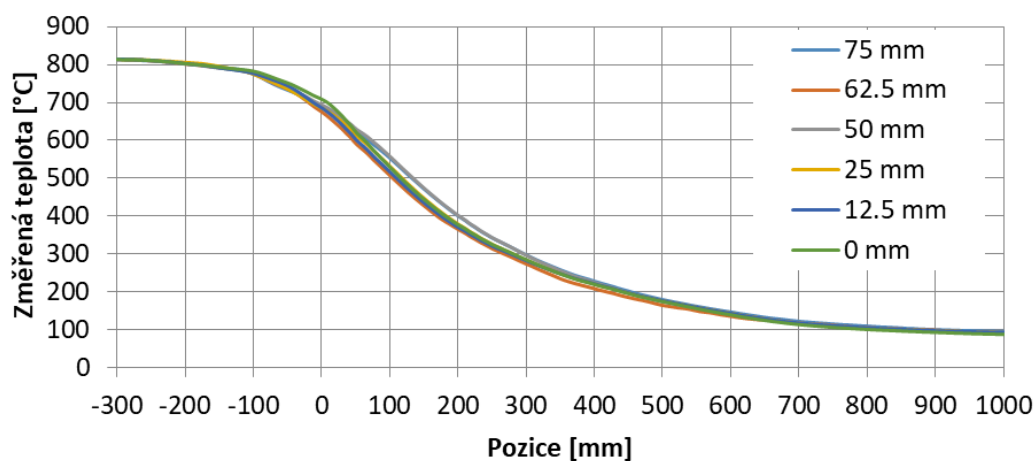


**Obr. 100** Ukázka studených testů vodního nože (vlevo), vliv úhlu dopadu vody na velikost součinitele přestupu tepla (vpravo), publikováno v [27]

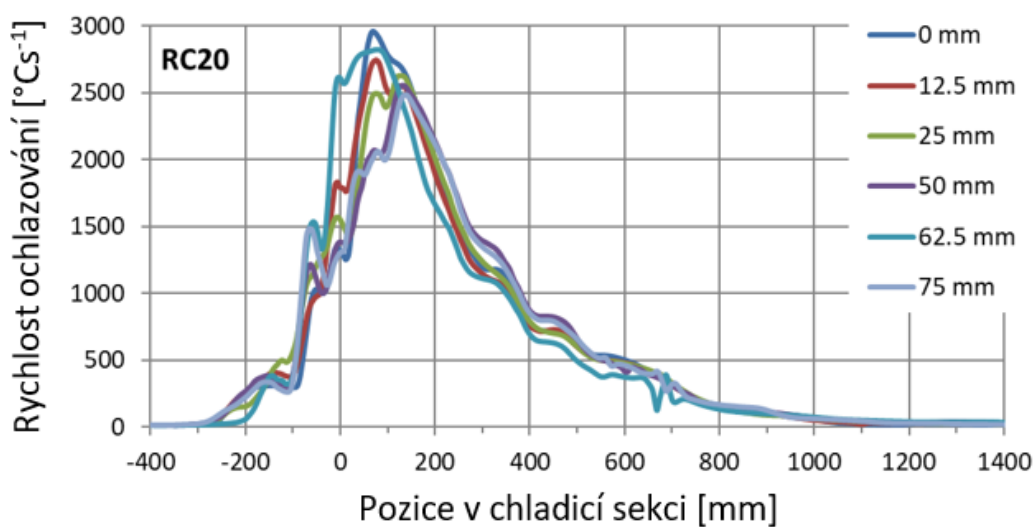
Dalším krokem byly teplotní testy, při kterých byla provedena optimalizace chlazení s ohledem na homogenitu chlazení, spotřebu vody a vysokou rychlost ochlazování. Celkem bylo testováno přes 20 různých konfigurací. Jedna z těchto konfigurací je zobrazena na Obr. 101. Maximální dosažená rychlost ochlazování pro střed plechu (hloubka 1 mm) je zobrazena na Obr. 103. Homogenita chlazení je zobrazena pomocí naměřených teplot na plechu (Obr. 102). Tento chladicí systém byl instalován v ocelárně v USA.



**Obr. 101** Ukázka chladicí sekce pro teplotní testy (vlevo), pec umístěná pod chladicí sekci (vpravo)



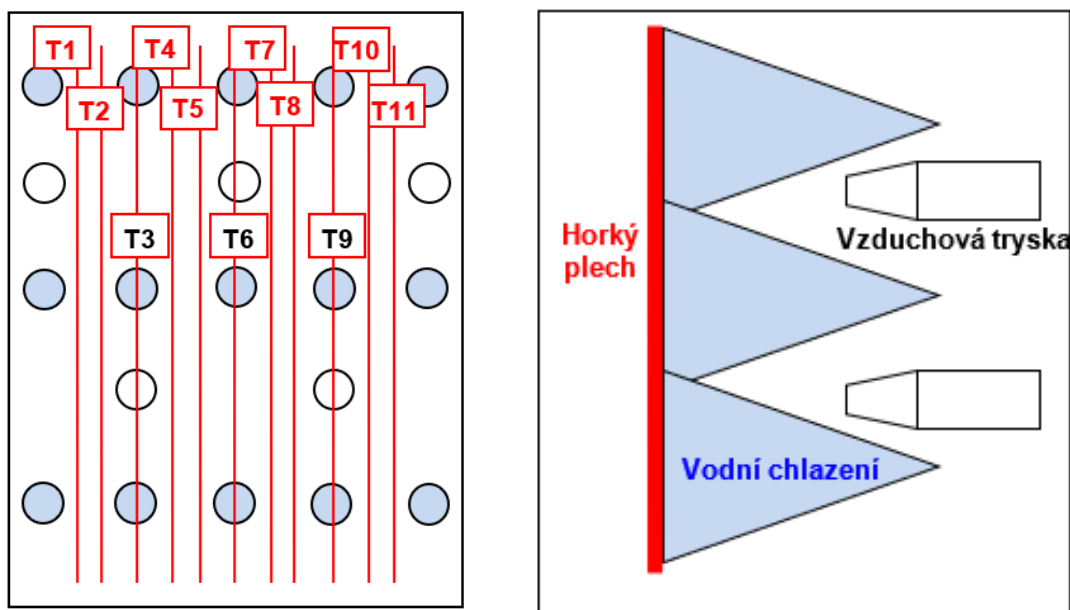
**Obr. 102** Změřené teploty na zadní straně plechu (hloubka 1 mm) v různých vzdálenostech od středu desky po šířce plechu (kolmo na směr pohybu plechu, 0 je ve středu desky)



**Obr. 103** Výsledná rychlost ochlazování pro homogenní chladicí systém po šířce plechu od 0 (střed) do 75 mm (kraj plechu)

#### 4.10 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. 104.



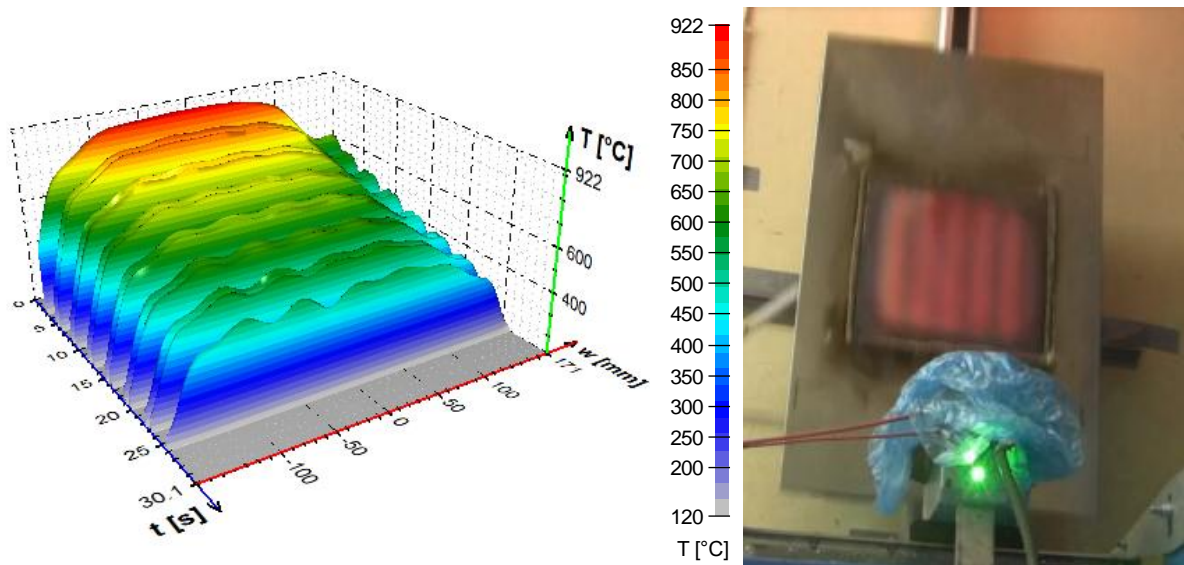
**Obr. 104** Schéma rozložení vzduchových (modré kruhy) a vodních trysek (bílé kruhy) s kuželovým paprskem společně s pozicí termočlánků (vlevo, čelní pohled) a schéma rozložení trysek z bočního pohledu (vpravo)

Pro tyto experimenty byl použit vertikální stand (Obr. 49 vpravo). Byla provedená rozsáhlá studie chlazení kombinující různé tlaky vody (0 – 15 bar) a vzduchu (0 – 16,5 kPa).

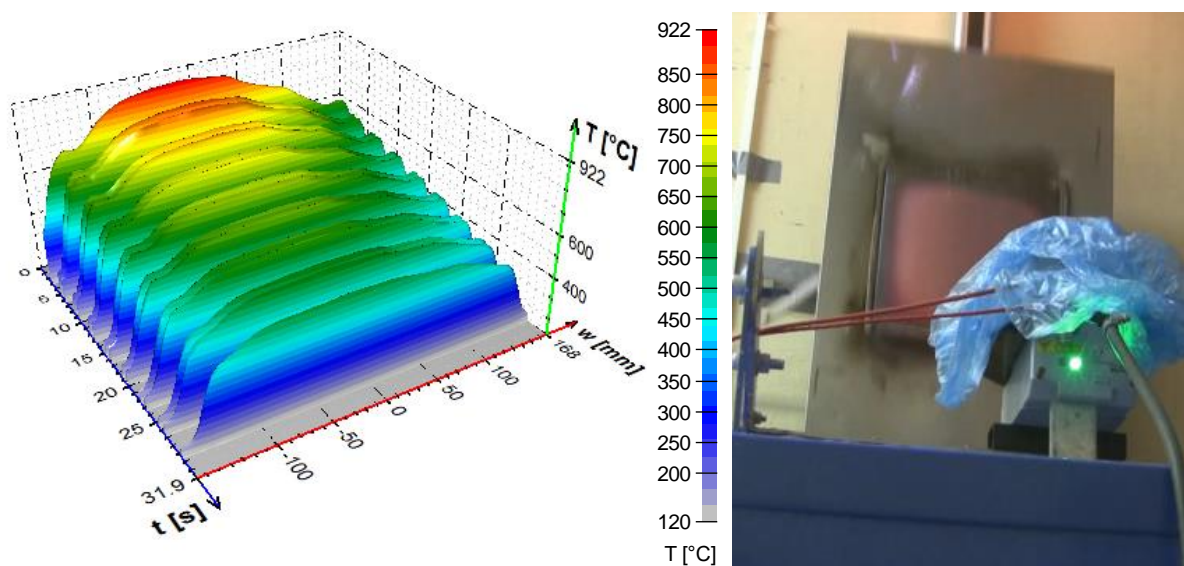
Nejprve byly provedeny testy na homogenitu chlazení s infračerveným řádkovým scannerem Raytek RAYTMP150MT, který byl umístěn mezi pecí a chladicí sekce. Scanner byl umístěn tak, aby zaznamenával teploty po šířce plechu. Vzorek se pohyboval přes řádkový scanner při každém průjezdu chladicí sekce. Povrchová teplota experimentálního vzorku byla sejmuta před vstupem do chladicí sekce při každém lichém průjezdu (ze shora dolů) a po výjezdu z chladicí sekce při každém sudém průjezdu (ze zdola nahoru). Na Obr. 106 a Obr. 107 jsou ukázky homogenního chlazení (chlazení pouze vzduchem) a nehomogenního chlazení (tlak vody 5 bar a tlak vzduchu 3 kPa).



**Obr. 105** Řádkový scanner Raytek RAYTMP150MT (vlevo), experimentální deska po průjezdu před řádkovým scannerem umístěným mezi chladicí sekci (dole) a pecí (nahore)

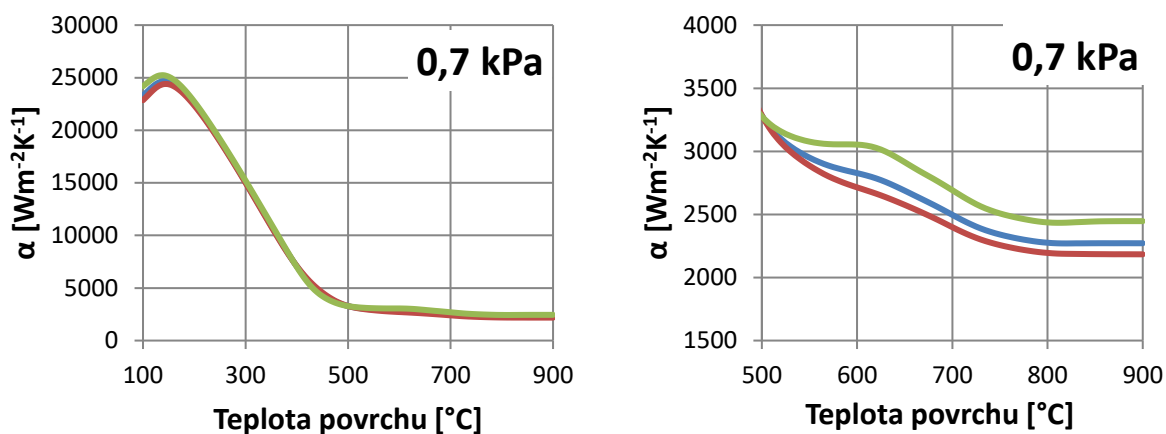


**Obr. 106** Ukázka záznamu z řádkového scanneru pro střed plechu – nehomogenní chlazení  $T$  – teplota povrchu,  $t$  – čas a  $w$  je šířka plechu, tlak vody 5 bar a tlak vzduchu 3 kPa

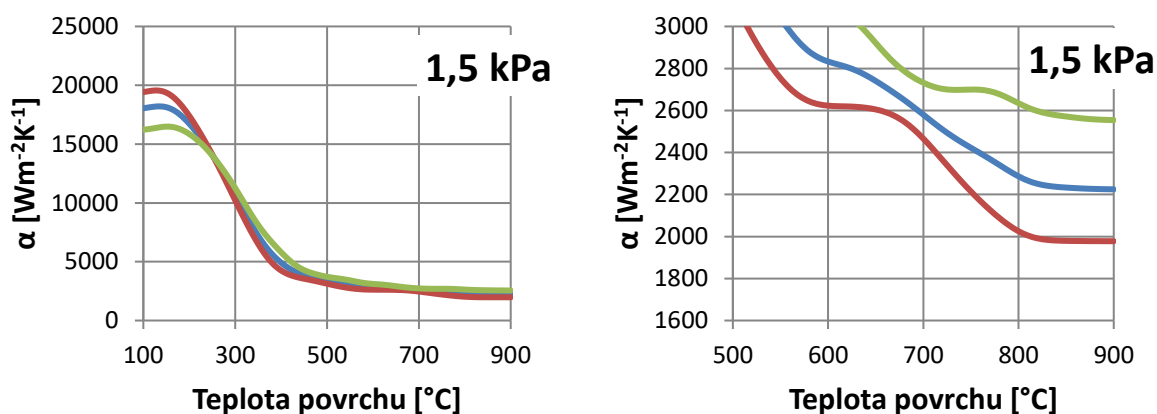


**Obr. 107** Ukázka záznamu z řádkového scanneru pro střed plechu – homogenní chlazení, chlazení pouze vzduchem

Dále byly provedeny teplé testy s termočláňky přivařenými na zadní straně plechu. Termočláňky byly umístěny v pozicích pod tryskami (T3, T6 a T9) a v pozicích mezi tryskami (T1, T2, T4, T5, T8, T10, T11). Pozice termočláňků je uvedena na schématu v Obr. 104 (vlevo). Výsledky těchto experimentů ukázaly, že se zvyšujícím se tlakem vzduchu se zvyšuje nehomogenita chlazení (Obr. 108 - Obr. 112). Zelené křivky reprezentují oblast pod tryskami (průměr z termočláňků pod tryskami) a červené křivky reprezentují oblast mezi tryskami (průměr z termočláňků v oblasti mezi tryskami).

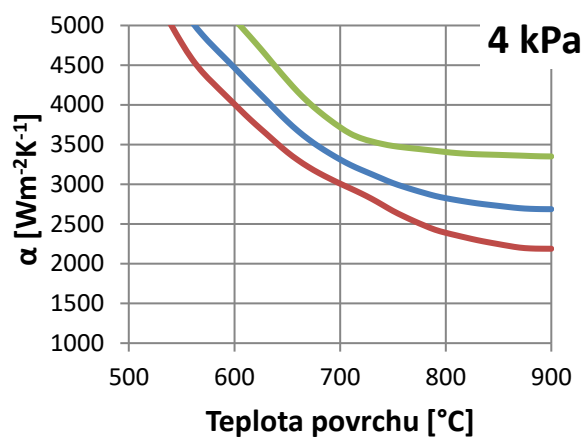
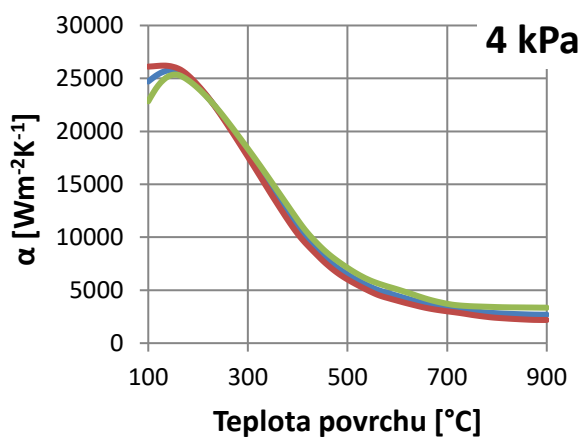


**Obr. 108** Průměrný součinitel přestupu tepla pro kombinaci tlaku vody 15 bar a vzduchu 0.7 kPa, vysokoteplotní oblast (vpravo)

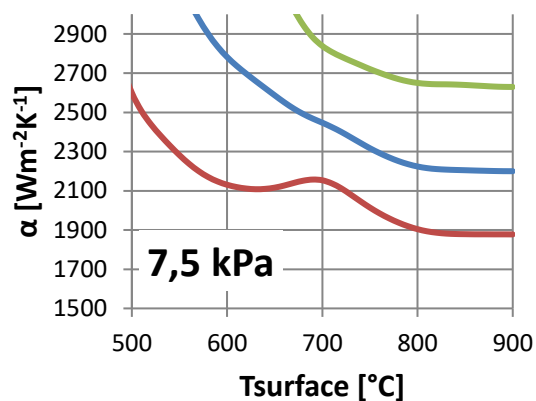
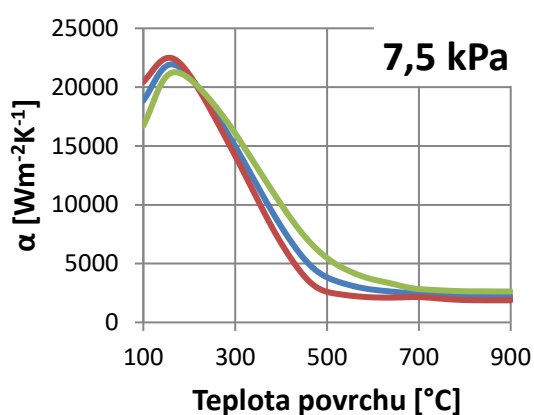


**Obr. 109** Průměrný součinitel přestupu tepla pro kombinaci tlaku vody 15 bar a vzduchu 1,5 kPa, vysokoteplotní oblast (vpravo)

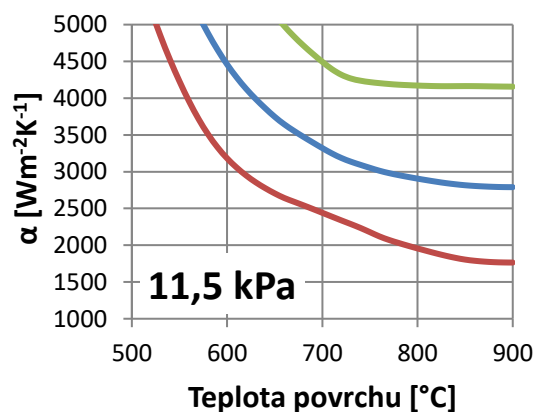
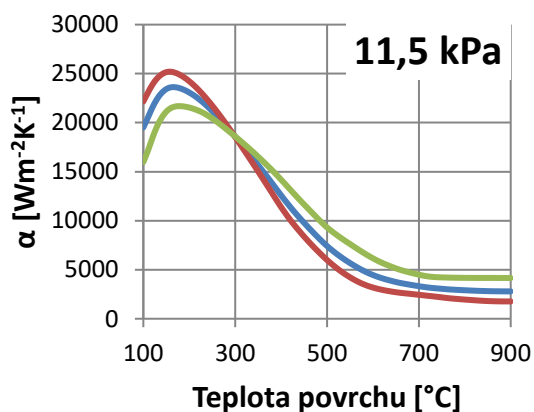




**Obr. 110** Průměrný součinitel přestupu tepla pro kombinaci tlaku vody 15 bar a vzduchu 4 kPa, vysokoteplotní oblast (vpravo)

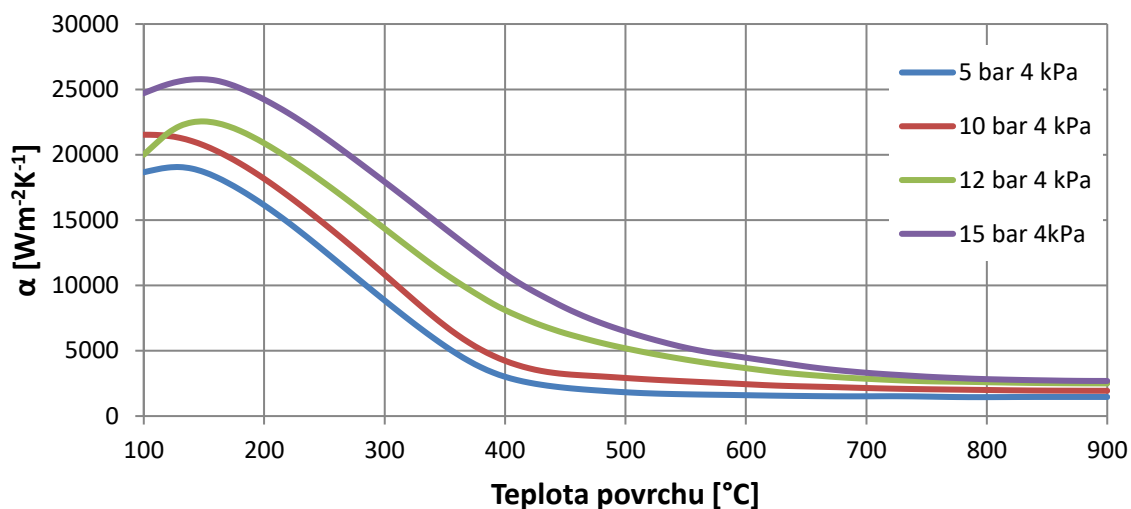


**Obr. 111** Průměrný součinitel přestupu tepla pro kombinaci tlaku vody 15 bar a vzduchu 7,5 kPa, vysokoteplotní oblast (vpravo)

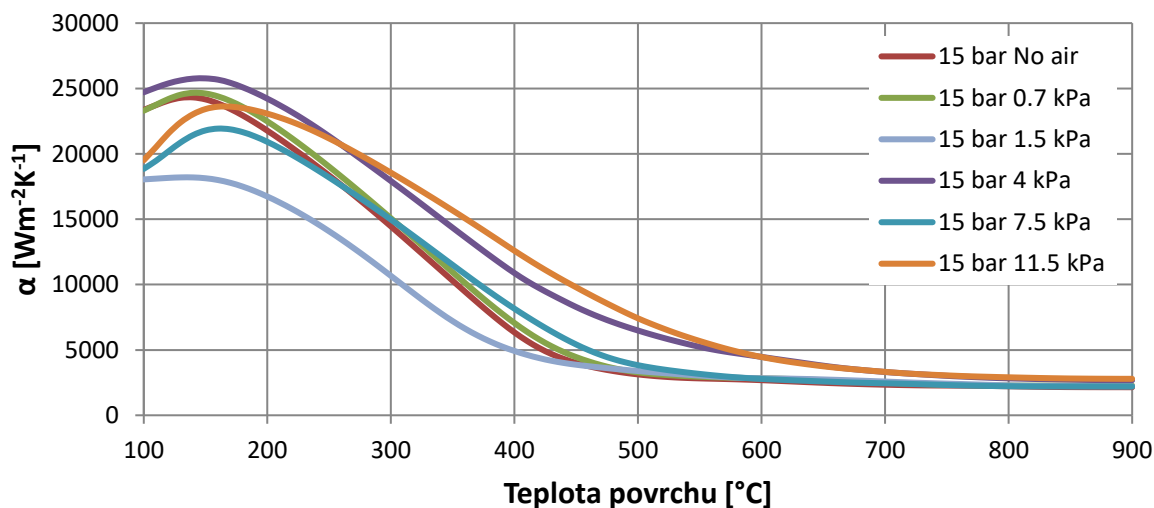


**Obr. 112** Průměrný součinitel přestupu tepla pro kombinaci tlaku vody 15 bar a vzduchu 11,5 kPa, vysokoteplotní oblast (vpravo)

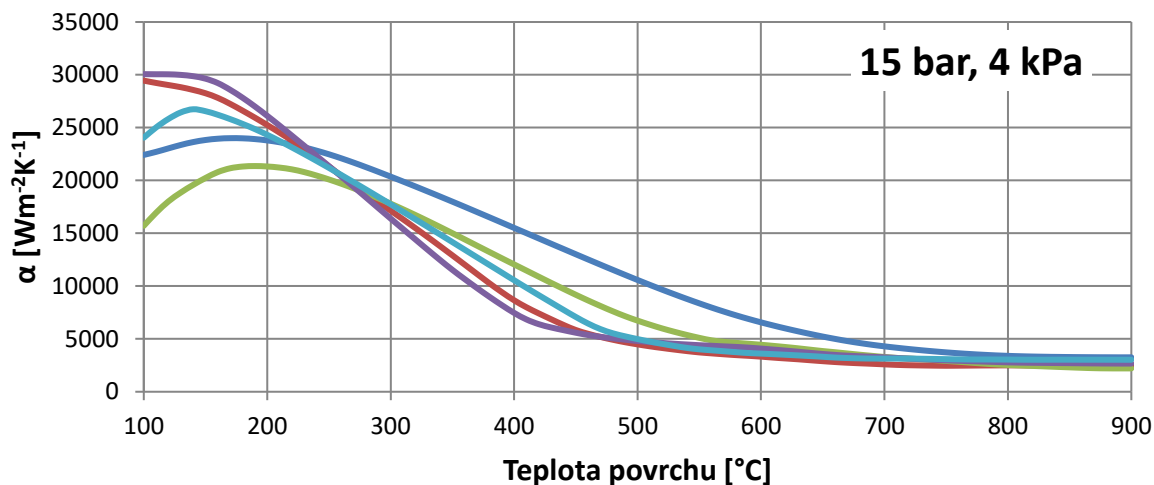
Při porovnání průměrných hodnot intenzit chlazení (modré křivky) byly zjištěny nelogičnosti v součinitelích přestupu tepla. V případě konstantního tlaku vzduchu se se zvyšujícím se tlakem vody zvyšuje součinitel přestupu tepla (Obr. 113). Ovšem v případě konstantního tlaku vody a zvyšujícího se tlaku vzduchu už není zřejmá tendence růstu součinitele přestupu tepla. Nejvyšší intenzita byla zjištěna pro experimenty s 4 a 11,5 kPa vzduchu (Obr. 114). Z tohoto důvodu byly provedeny testy opakovatelnosti, jež potvrdily nevyhovující opakovatelnost pro experimenty se vzduchem. Příklady opakovatelnosti jsou uvedeny na Obr. 115 a Obr. 116. Z toho důvodu byla ověřena opakovatelnost také u experimentů s pouze zapnutým vodním chlazením (vypnutým chlazením vzduchem). Příklad vyhovující opakovatelnosti je uveden na Obr. 117.



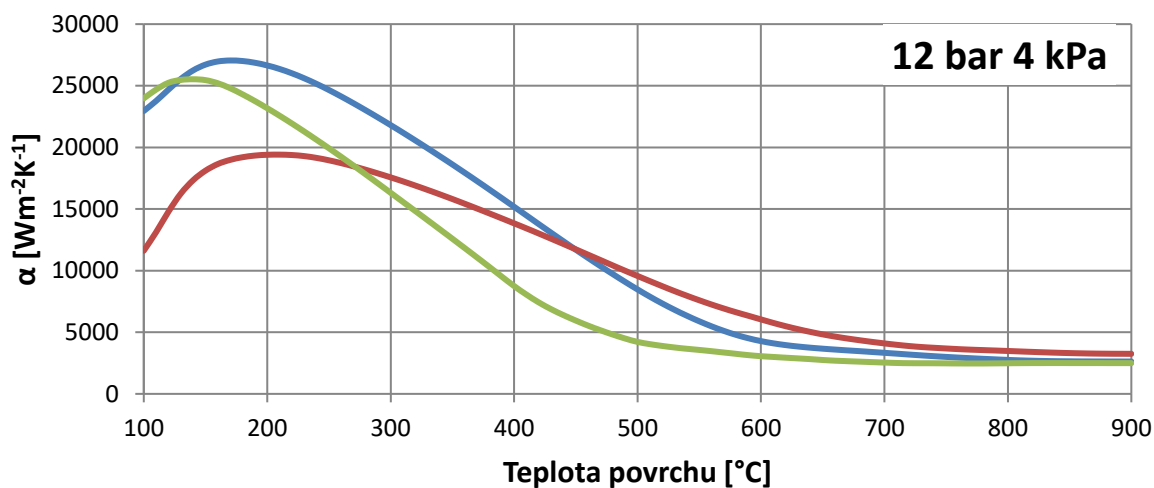
**Obr. 113** Závislost součinitele přestupu tepla na povrchové teplotě pro zvyšující se tlak vody



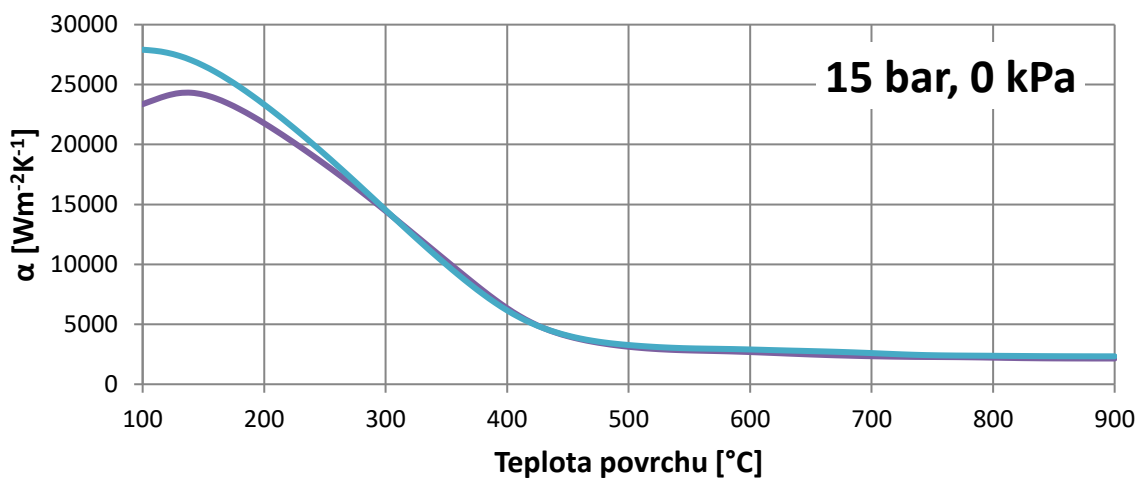
**Obr. 114** Závislost součinitele přestupu tepla na povrchové teplotě pro zvyšující se tlak vzduchu



**Obr. 115** Opakovatelnost měření pro nastavení tlaku vody 15 bar a vzduchu 4 kPa

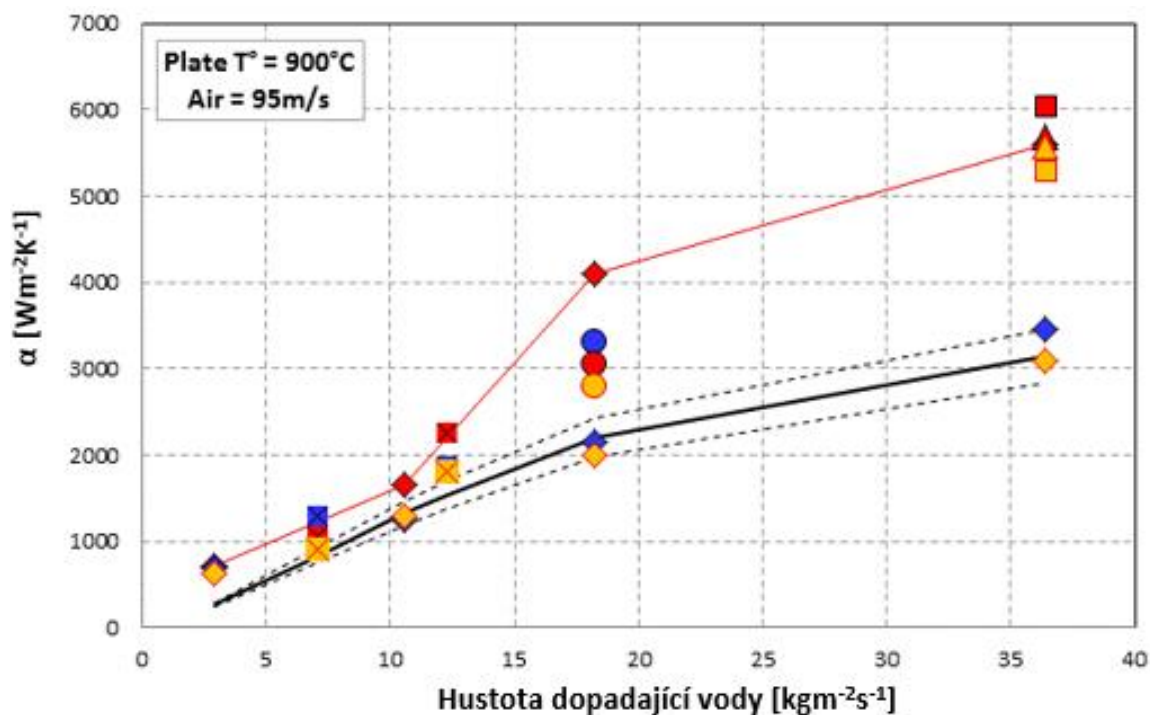


**Obr. 116** Opakovatelnost měření pro nastavení tlaku vody 12 bar a vzduchu 4 kPa



**Obr. 117** Opakovatelnost měření pro nastavení tlaku vody 15 bar, chlazení vzduchem bylo vypnuté

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 společném chlazení vodou a vzduchem kopírují změřené součinitele přestupu tepla trend s modelem, avšak jsou lehce vyšší až do hustoty dopadající vody  $12 \text{ kgm}^{-2}\text{s}^{-1}$ . Od této hodnoty dochází k prudkému nárůstu součinitele přestupu tepla a chlazení je potenciaálně nestabilní Obr. 118. 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. 118** Porovnání změřených hodnot s Wendelstorfovým 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 nejnižší, 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 chladiva. Bylo tedy navrženo separovat chlazení od lubrikace, a to pomocí vodního nože. Jako chladivo 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<sup>-1</sup>. 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 spolupráci 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<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>, kdy při vodo-vzdušném chlazení dochází k nárůstu 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 článcích 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., Vervaeet 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 17<sup>th</sup> 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 24<sup>th</sup> 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 21<sup>st</sup> International Conference on Metallurgy and Materials, 2012, Brno, Czech republic, pp. 129-134
- [26] Hnizdil M., Chabicosky 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., Chabicosky 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.