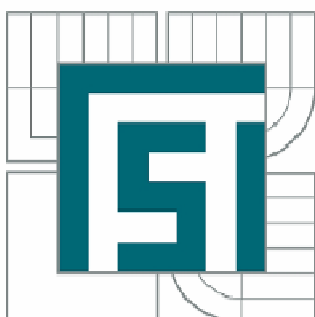




VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

ÚSTAV MECHANIKY TĚLES, MECHATRONIKY A
BIOMECHANIKY

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

INSTITUTE OF SOLID MECHANICS, MECHATRONICS AND
BIOMECHANICS

NÁVRH EXPERIMENTU PRO ŘEŠENÍ INVERZNÍ ÚLOHY VEDENÍ TEPLA

DESIGN OF EXPERIMENT FOR INVERSE HEAT TRANSFER PROBLEM

DIZERTAČNÍ PRÁCE

DOCTORAL THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Ing. ALEŠ HORÁK

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

prof. Ing. MIROSLAV RAUDENSKÝ,
CSc.

BRNO 2010



Prohlášení

Prohlašuji, že jsem disertační práci zpracoval samostatně dle pokynů vedoucího disertační práce s použitím uvedené literatury.

2.1.2011



Ing. et. Ing Aleš Horák

Poděkování

Rád bych poděkoval mému vedoucímu disertační práce prof. Ing. Miroslavu Raudenskému, CSc. za dlouhodobé a trpělivé vedení mé disertační práce. Dále bych chtěl poděkovat všem spolupracovníkům v Laboratoři přenosu tepla a proudění. Obzvláštní dík pak patří doc. Ing. Jaroslavu Horskému, CSc., Ing. Michalu Pohankovi, PhD., Ing. Petru Kotrbáčkovi, PhD. a Ing. Haně Bellerové.



V této práci je komplexně studována inverzní úloha vedení tepla s důrazem na optimální návrh experimentu. V technické praxi se vyskytuje mnoho aplikací, v nichž jsou nebo mohou být inverzní úlohy použity. Jedná se především o metalurgické procesy v průmyslu jako je chlazení při kontinuálním odlévání ocelí, hydraulické odkujování či válcování za tepla. Inverzní úlohy se obecně využívají ke zjišťování okrajových podmínek diferenciálních rovnic a ve výše zmíněné problematice slouží ke stanovování součinitele přestupu tepla (HTC – Heat transfer coefficient). Znalost přibližného numerického řešení přesné hodnoty okrajové podmínky je v dnešní době pro mnoho aplikací klíčové, např. umožňuje navrhnout vhodné chlazení válcovacích stolic s důrazem na požadované vlastnosti a kvalitu finálního produktu. V práci je pro řešení inverzní úlohy použit Beckův sekvenční algoritmus v kombinaci s optimalizačními metodami na vybrané problémy z výše zmíněných oblastí.

Vzhledem ke specifickým požadavkům a vysokým nárokům na přesnost měření bylo v rámci této práce navrženo a postaveno speciální experimentální zařízení pro zjišťování intenzity přenosu tepla. Experimentální zařízení bylo vybaveno čtyřmi typy různých teplotních senzorů, jež slouží v Laboratoři přenosu tepla a proudění (LPTaP) na různých již existujících experimentálních zařízeních. První typ senzoru slouží k provádění experimentů simulujících chlazení při kontinuálním lití. Druhý senzor je určen pro experimenty spojené s chlazením válcovací stolice a třetí senzor pak pro chlazení rychle se pohybujícího válcovaného tělesa. Poslední senzor je upravenou verzí prvního typu, ovšem s termočlánekem umístěným rovnoběžně s chlazeným povrchem.

V experimentální části byla provedena série měření pro zjištění HTC pro různé typy chladiv, chladících směsí a ošťikových parametrů. Zjištěné výsledky, které byly porovnány s dostupnými publikacemi, výrazně rozšiřují znalosti o účinnosti běžně používaných průmyslových chladiv.

V druhé části této práce byly prováděny numerické simulace chování senzorů. Konkrétně byly připraveny detailní modely uvažující jejich vnitřní geometrickou strukturu a rozdílné materiálové vlastnosti. Simulace byly prováděny s dlouhým a krátkým časovým pulzem HTC, dále pak s vlivem šumu v datech a sníženou přesností měřicího termočlánku.

Cílem této práce byl optimální návrh experimentu pro řešení inverzní úlohy vedení tepla, jehož výstupem jsou účinnosti chlazení (tzn. zjistit velikost HTC). Experimenty zahrnovaly širokou škálu chladiv (voda, olej, emulze, atd.) v závislosti na celé řadě parametrů (např. tlak, průtok chladiva). Důležitým parametrem byla též koncentrace rozpuštěných olejů v chladící emulzi. Druhým cílem bylo podrobné vyhodnocení výše popsaných senzorů, jejich přesnosti a použitelnosti při praktických experimentech.

Abstract

In this thesis complex inverse heat transfer problem, which is focused on optimal design of experiment, is studied. There are many fields and applications in technical practice, where inverse tasks are or can be applied. On first place main attention is focused on industrial metallurgical processes such as cooling of continuous casting, hydraulic descaling or hot rolling. Inverse problems are in general used to calculate boundary conditions of differential equations and in this field are used to find out Heat Transfer Coefficient (HTC). Knowledge of numerical approximation of precise boundary conditions is nowadays essential. It allows for example design of optimized hot rolling mill cooling focused on material properties and final product quality. Sequential Beck's approach and optimization method is used in this work to solve inverse heat transfer problems.

Special experimental test bench measuring heat transfer intensity was developed and built to full fill specific requirements and required accuracy. There were four different types of thermal sensor applied and studied. Those sensors are in usage in Heat Transfer and Fluid Flow laboratory (Heatlab) at various experimental test benches. Each specific sensor was tailored in Heat Transfer and Fluid Flow Laboratory to specific metallurgical application. First type of sensor was designed to simulate cooling during continuous casting. Second sensor is used for experiments simulate hot rolling mill cooling, while third sensor is designated for experiments with fast moving hot rolled products. Last sensor is similar to sensor type one, but thermocouple is located parallel to cooled surface.

Experimental part of this study covers series of measurements to investigate Heat Transfer Coefficient (HTC) for various types of coolant, cooling mixtures and spray parameters. Results discovered in this study were compared with published scientific articles, and widely extend the knowledge of cooling efficiency for commonly used industrial coolants.

Specific very detailed sensor models including internal geometrical structure and different material properties were prepared. Numerical simulations focus on long and short time period HTC pulses. Calculations were run even with noise factor applied into temperature records and with decreased thermocouples measuring sensitivity as well.

Main goal of this study was optimal design of experiment for inverse task problem to estimate cooling efficiency (find real values of HTC) for wide scale of coolants (diluted water, oil, emulsions, etc.) as factor of many parameters (e.g. coolant pressure and mass flow). Oil content in cooling emulsions was very important parameter as well. Second goal of this study was to run detail analysis of given sensors, to find their abilities, accuracy and practical experimental usability.



Klíčová slova

Inverzní úloha, přímá úloha, parciální diferenciální rovnice vedení tepla, Beckův sekvenční algoritmus, součinitel přestupu tepla, HTC, experimentální zjišťování účinnosti chlazení, chlazení vodou, emulzemi, chlazení oleji

Key Words

Inverse problem, direct problem, partial differential heat transfer equation, Beck's sequential algorithm, heat transfer coefficient, experimental HTC investigation, water and oil mixture cooling efficiency

HORÁK, A. Návrh experimentu pro řešení inverzní úlohy vedení tepla. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2011. 112 s. Vedoucí disertační práce prof. Ing. Miroslav Raudenský, CSc.



Seznam použitých symbolů a značek

a	tepelná vodivost [$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$]	$F(t)$	vektor tepelných zdrojů
c	měrná tepelná kapacita [$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$]	HTC	součinitel přestupu tepla [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$]
d	šířka desky [mm]	$K(t)$	matice tepelné vodivosti
i, j, k, l	indexy	Q	teplo [J]
$\vec{n}$	vnější normála hraniční plochy	S	součet čtverců odchylek teplot [K]
p	tlak [Pa]	T	(teoretická) teplota [$^{\circ}\text{C}$]
q	tepelný tok [W]	U_s	Seebeckovo napětí [V]
$\dot{q}$	měrný tepelný tok [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$]	V	objem [m^3]
t	čas [s]	Y	experimentálně zjištěná teplota [$^{\circ}\text{C}$]
v	rychlost dopadu [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$]	$\alpha_{a,b}$	Seebeckův koeficient [$\text{V} \cdot \text{K}^{-1}$]
w	váha [-]	β	kořen transcendentních rovnic [-]
x, y, z	kartézské souřadnice [m]	ε	emisivita tělesa [-]
A	plocha [m^2]	λ	součinitel tepelné vodivosti [$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$]
Bi	Biotovo číslo [-]	σ	Stefan-Boltzmannova konstanta [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$]
$C(t)$	matice tepelné kapacity	ρ	hustota [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$]
D_{HTC}	derivace T podle HTC [$\text{W}^{-1} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{K}^2$]	Γ	plocha, hranice oblasti
Fo	Fourierovo číslo [-]	θ	vážený průměr θ -metody [-]



1. Úvod	9
2. Současný stav teorie inverzní úlohy vedení tepla	9
2.1. Přenos tepla	10
2.2. Parciální diferenciální rovnice vedení tepla	11
2.3. Počáteční a okrajová podmínka	12
2.4. Analytické řešení rovnice vedení tepla	13
2.5. Numerické řešení rovnice vedení tepla	14
2.6. Inverzní úlohy vedení tepla	17
2.7. Jednorozměrná inverzní úloha vedení tepla	18
2.8. Testovací úlohy	20
3. Experimentální část	26
3.1. Experimentální zařízení	26
3.3. Charakteristiky použitých čidel.....	31
3.4. Experimentální plán	39
3.5. Popis přimíchávaných chemikálií a maziv	42
4. Popis výsledků	46
4.1. Měřená data a postup výpočtu	46
4.2. Měření se vzorkem B	49
4.3. Měření se vzorkem A	52
4.4. Porovnání chladičů	56
4.5. Řízené chlazení	65
4.6. Srovnání výsledků s publikovanou literaturou	69
4.7. Měření s více senzory	75
5. Závěr	102
6. Conclusion	105
7. Literatura	108
8. Publikace a projekty autora	110



1. Úvod

S rozvojem techniky v mnoha oborech nabývá na důležitosti přesná znalost rozložení teploty v tělesech. Ve strojírenských aplikacích, jako je např. kontinuální odlévání nebo válcování za tepla, je znalost průběhu teplotního pole v čase naprosto nezbytná. Aplikování teoretických poznatků do praxe může přinést celou řadu pozitiv.

Tato práce se zabývá návrhem tepelných experimentů a inverzními úlohami vedení tepla, které jsou založeny na řešení parciálních diferenciálních rovnic. Rovnice vedení tepla jsou parabolického typu. Teoretické řešení takovýchto rovnic je již známé, problémem zůstává zjišťování jejich okrajových podmínek. Práce je proto zaměřena zejména na zjišťování okrajových podmínek rovnice vedení tepla.

V práci jsou uvedeny výsledky numerických výpočtů pro určité typy testovacích úloh. Testovací úlohy sloužily převážně k osvojení problematiky řešení inverzních úloh a určení limitů použitelnosti algoritmů pro návrh experimentu. Experimentální část práce obsahuje nejprve návrh a stavbu experimentálního zařízení na zjišťování okrajových podmínek. Zařízení, jež bylo vyvinuto za finanční pomoci grantu VaV FSI VUT, umožňuje studium chlazení kovových materiálů v širokém rozsahu teplot a aplikací. Měření při teplotách až 1 200 °C pomáhají lépe porozumět aplikacím jako jsou hydraulické odkujování, chlazení odlitků nebo provalků. Experimenty za nižších teplot okolo 250 °C jsou užitečné např. pro zjišťování účinnosti chlazení různých typů průmyslových chladiv a chladících směsí či chlazení válců válcovacích stolic. Experimentální plán, jež byl součástí této disertační práce, obsahoval sérii experimentů z těchto oblastí. Měření na zjišťování účinnosti různých chladiv byla součástí evropského projektu EWRCOOL.

Experimentálně získaná data sloužila jako základ pro praktické využití teorie inverzních úloh. Na takto získaná data byl aplikován inverzní algoritmus vyvinutý v Laboratoři přenosu tepla a proudění. Výpočtový algoritmus byl pro potřeby této práce upraven tak, aby co nejpřesněji simuloval použité teplotní senzory. Výše zmíněné experimentální zařízení bylo vybaveno čtyřmi rozdílnými typy teplotních senzorů. Cílem práce bylo také studium senzorů, což je zásadní pro optimální návrh experimentu pro řešení inverzní úlohy vedení tepla. Rozdílnost senzorů je dána různými technickými aplikacemi, pro které jsou využívány. Konstrukční řešení senzorů a technologické postupy výroby dávají každému specifické vlastnosti. Rychlost odezvy, přesnost měření, náchylnost na šum jsou některé z nich, které radikálně ovlivňují měřená data. Kvalita vstupních dat je přitom, vzhledem ke špatné podmíněnosti inverzních úloh, klíčová a zásadně ovlivňuje celý výpočet. Práce proto obsahuje různé testovací úlohy, jejichž cílem bylo zjištění použitelnosti konkrétního senzoru.



2. Současný stav teorie inverzní úlohy vedení tepla

2.1. Přenos tepla

Nauka o přenosu tepla – termokinetika – se zabývá šířením tepla v prostoru a čase. Ve smyslu druhého termodynamického zákona se teplo šíří samovolně z místa s vyšší teplotou do místa s nižší teplotou [1]. Rozeznáváme tři základní typy přenosu tepla (obr.2.1) podle toho, v jakém prostředí a na jakých fyzikálních základech se tento pohyb tepelné energie uskutečňuje: přenos tepla vedením, prouděním a zářením.

Přenos tepla vedením (kondukcí) je pohybem tepla v důsledku konečného rozdílu teploty v tuhé fázi hmoty nebo v klidové kapalně resp. plynné fázi hmoty. Přenos tepla kondukcí je ve smyslu kinetické teorie tepla důsledek energetické výměny mikropohybu částic hmoty. Tepelná energie je transportována od více-energetických částic k méně-energetickým. Typickým příkladem je časově stálé vedení tepla rovinou deskou s různou teplotou povrchů T_1 a T_2 , což je znázorněno na obr. 2.1. vlevo. Podle Fourierova zákona [2],

$$\dot{q} = -\lambda \frac{dT}{dx} \quad (2.1)$$

je měrný tepelný tok $\dot{q}$ až na znaménko přímo úměrný teplotnímu gradientu.

Přenos tepla prouděním (konvekci) je složen ze dvou mechanismů. Prvním z nich je náhodný pohyb molekul – difuze (jako u vedení v tekutinách). Ke sdílení tepla v proudících tekutinách přispívá i druhý – makroskopický mechanismus. Tzn. že v kterémkoliv okamžiku se pohybuje velké množství molekul kolektivně a dochází k mísení molekul hmoty o různé teplotě [3]. Protože si molekuly v proudícím makro-objemu ponechávají svůj náhodný pohyb, je přenos energie důsledkem superpozice obou mechanismů. Konvekce je obvykle klasifikována podle povahy proudění na přirozenou, nucenou a kombinovanou. Na obr.2.1. uprostřed dochází k přenosu tepla konvekci z teplejšího pevného tělesa o teplotě T_s do proudící tekutiny T_∞ . V tomto případě je měrný tepelný tok popisován Newtonovým ochlazovacím zákonem, který má tvar :

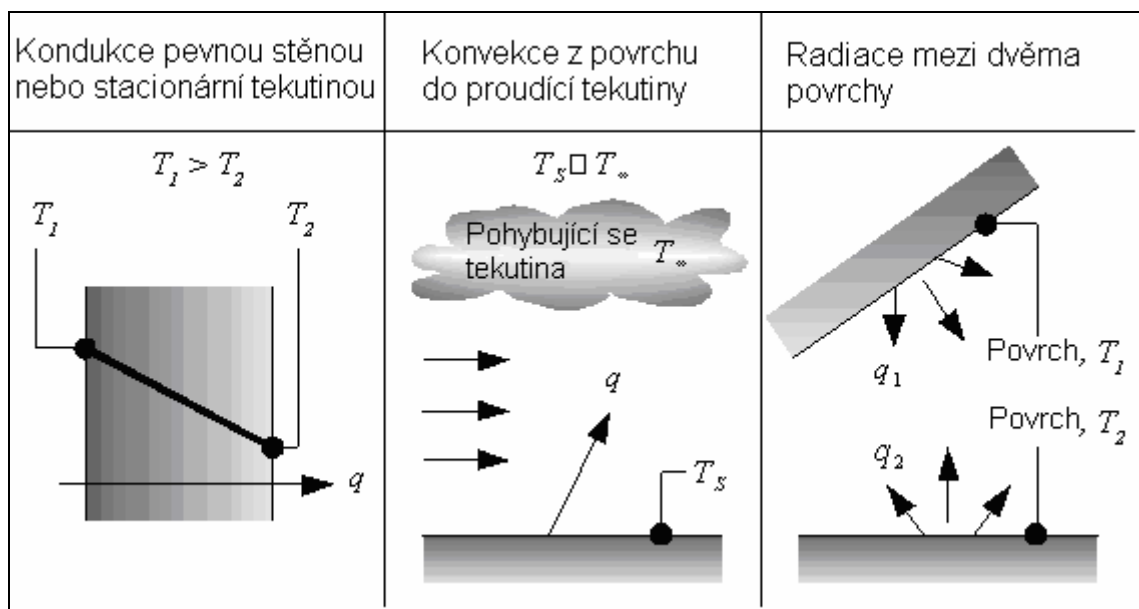
$$\dot{q} = HTC(T_s - T_\infty) \quad (2.2).$$

Přenos tepla zářením (radiací) je tepelný proces uskutečňovaný elektromagnetickým vlněním určité vlnové délky. Teplo emituje každý povrch, jenž má nějakou konečnou teplotu. Radiace je tak jediný způsob, jakým se teplo může šířit i ve vakuu. Měrný tepelný tok $\dot{q}$ je kvantifikován Stefan-Boltzmannovým zákonem :

$$\dot{q} = \varepsilon \sigma T^4 \quad (2.3),$$



Každé těleso teplo současně vyzařuje i pohlcuje, viz obr.2.1. vpravo. V běžných technických případech se na přenosu tepla podílejí všechny tři způsoby současně, ale ne nutně rovnoměrně. V mnoha případech se stává, že jeden z výše uvedených způsobů převládá, což značně zjednodušuje řešení daného problému.



Obr.2.1. Schematické znázornění kondukcce, konvekce a radiace [4]

2.2. Parciální diferenciální rovnice vedení tepla

U praktických inženýrských úloh obvykle nestačí nebo nelze spočítat tepelný tok a je nutné znát kompletní tepelné pole daného objektu, tj. rozložení izoterem a teplotních gradientů. Vyřešení teplotních polí bývá často počátkem podstatně komplikovanějších úloh, které spočívá i v řešení teplotních napětí a s tím spojených namáhání součástí. Nástrojem pro řešení podobných úloh je parciální diferenciální rovnice (PDR) vedení tepla (někdy nazývaná rovnice tepelné difúze). Uvažujeme-li homogenní 3D těleso s vnitřním generováním tepelné energie v kartézském souřadném systému a nestacionární případ, rovnice vedení tepla má pak tvar:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) + Q_{\text{vnitř.}} = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2.4).$$

V případě cylindrických souřadnic má rovnice následující tvar:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial \varphi} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial \varphi} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) + Q_{\text{vnitř.}} = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2.5).$$

Budeme-li předpokládat konstantní tepelnou vodivost λ v celém tělese, pak se rovnice 2.4. a 2.5. značně zjednodušují a zavádí se do nich veličina:

$$a = \frac{\lambda}{\rho c} \quad (2.6),$$

která se nazývá teplotní vodivost. Materiály s velkým součinitelem a reagují rychleji na teplotní změnu v okolí než materiály s malou teplotní vodivostí. Rovnice 2.4 může být dále transformována do sférických souřadnic nebo dále zjednodušována, např. pro ustálené teplotní pole (více v [1], [2], [3] a [4]).

2.3. Počáteční a okrajová podmínka

Řešení rovnice vedení tepla není možné bez znalosti počáteční a okrajové podmínky. Dále je nutno znát materiálové charakteristiky výpočtové oblasti v závislosti na teplotě, tj. hustotu $\rho(T)$, tepelnou kapacitu $c(T)$ a tepelnou vodivost $\lambda(T)$. Uvažujeme-li $T(x,y,z,t)$ jako teplotní pole, pak počáteční podmínka má tvar:

$$T(x, y, z, 0) = T_0(x, y, z) \quad (2.7),$$

kde T_0 je vhodná spojitá funkce.

Pro jednoznačné řešení PDR vedení tepla je nutno zadat okrajové podmínky na hranici řešené oblasti Γ . Okrajová podmínka 1. druhu (Dirichletova) předepisuje teplotu na povrchu T_Γ zkoumaného tělesa:

$$T(x, y, z, t) = T_\Gamma(t) \quad \forall x, y, z \in \Gamma \quad (2.8).$$

Kromě teploty můžeme předepsat na hranici i měrný tepelný tok $\dot{q}_\Gamma$ hranicí Γ . Této podmínce se říká Neumannova nebo též podmínka 2. druhu:

$$-\lambda \frac{\partial T(x, y, z, t)}{\partial \vec{n}} = \dot{q}_\Gamma(t) \quad \forall x, y, z \in \Gamma \quad (2.9),$$

kde $\vec{n}$ je vnější normála hraniční plochy. V případě, že je hranice zkoumaného tělesa tepelně izolovaná – adiabatická, má Neumannova podmínka následující tvar:

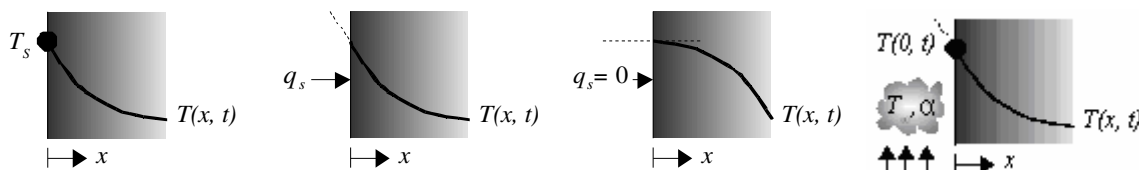
$$-\lambda \frac{\partial T(x, y, z, t)}{\partial \vec{n}} = 0 \quad \forall x, y, z \in \Gamma \quad (2.10).$$

V případě, že povrch tělesa je vystaven proudění nějaké tekutiny, je jedno zda dochází ke chlazení či ohřevu, a předepisuje se Newtonova podmínka 3. druhu ve tvaru:

$$-\lambda \frac{\partial T(x, y, z, t)}{\partial \vec{n}} = HTC(T_\infty - T_\Gamma(t)) \quad \forall x, y, z \in \Gamma \quad (2.11),$$



kde T_∞ je teplota proudící tekutiny a HTC součinitel přestupu tepla. Obr.2.2. graficky znázorňuje okrajové podmínky v 1-dimensionální úloze.



Obr.2.2. Znázornění Dirichletovy, Neumannovy (neizolovaný a izolovaný povrch) a Newtonovy podmínky pro jednorozměrnou úlohu vedení tepla [4]

2.4. Analytické řešení rovnice vedení tepla

Řešit PDR vedení tepla pomocí analytických metod lze pouze pro některé jednoduché geometrie se speciálně zadanými okrajovými podmínkami. Je-li problém komplikovanější a analytický postup selhává, je nutno přistoupit k přibližnému numerickému řešení (viz. kapitola 2.2.5). Mezi případy řešitelné analyticky patří jednorozměrné vedení tepla nekonečně rozměrnou deskou (obr.2.3) s počáteční teplotou T_0 konečné tloušťky d s konstantními materiálovými vlastnostmi (c, ρ, λ) v prostředí stálé teploty T_∞ se součinitelem přestupu tepla α [1]. Výše popsaná rovnice je parabolického typu [10] s okrajovou podmínkou 3. druhu (Newtonova) a lze pomocí ní řešit jak proces ohřevu, tak chlazení. Řešení má dle [3] tvar:

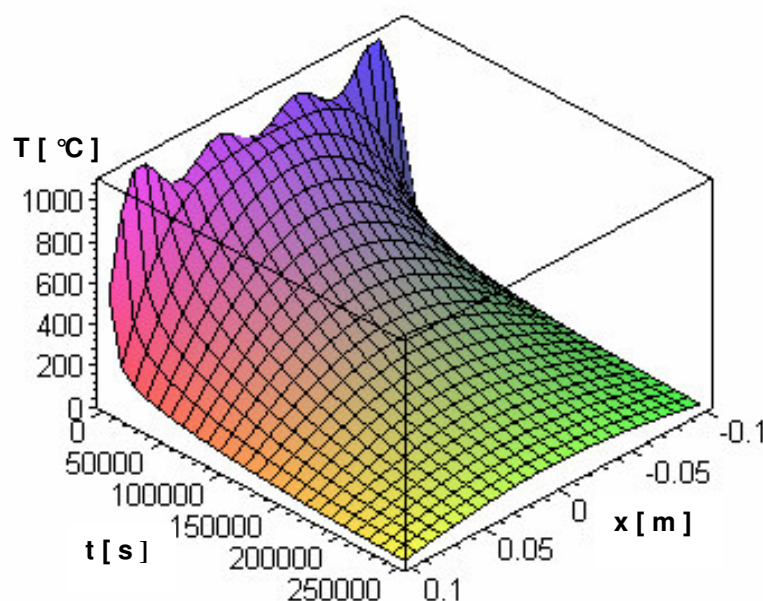
$$\frac{T(x,t) - T_\infty}{T_0 - T_\infty} = \sum_{i=1}^{i=\infty} \frac{\sin \beta_i}{\beta_i + \sin \beta_i \cos \beta_i} e^{-\beta_i^2 F_0} \cos\left(\frac{\beta_i x}{d}\right) \quad (2.12),$$

kde β_i jsou kořeny transcendentních rovnic :

$$\cot g\beta = \frac{\beta}{Bi} \quad (2.13), \quad tg\beta = \frac{Bi}{\beta} \quad (2.14),$$

Výraz F_0 je tzv. Fourierovo číslo, resp. Bi je tzv. Biotovo číslo:

$$F_0 = \frac{4at}{d^2} \quad (2.15), \quad Bi = \frac{HTCd}{2\lambda} \quad (2.16).$$



Obr.2.3. Teplotního pole v rovinné desce, řešení s prvními 4 členy řady (2.12); $d=20\text{mm}$, $HTC=1000\text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$, $\lambda=13,75\text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$, $\rho=7920\text{ kg.m}^{-3}$, $c=489,85\text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$, $T_{\infty}=0\text{ °C}$, $T_0=1000\text{ °C}$ [11]

2.5. Numerické řešení rovnice vedení tepla

V případě, že řešení rovnice vedení tepla nelze najít analyticky, je nutné hledat přibližné řešení vhodnými numerickými metodami. V současnosti existuje nepřehledné množství numerických metod, z nichž nejznámější a nejpoužívanější jsou metoda konečných objemů (MKO) [4,8,10] a metoda konečných prvků (MKP) [4,9,12]. Méně známou metodou je metoda aplikující kubické splajny [5]. Parciální diferenciální rovnice popisují celou řadu jak fyzikálních, tak inženýrských problémů z oblastí jako je přenos tepla, elektromagnetismus, mechanika těles a tekutin atd. Obecně se PDR člení na stacionární a nestacionární (někdy též evoluční). Stacionární jsou ty, jejichž členy jsou na čase nezávislé, úlohy nestacionární naopak na čase závislé. Dělení PDR na eliptické, parabolické a hyperbolické získaly na základě formální podobnosti s rovnicemi kuželoseček. Příkladem eliptické rovnice je stacionární rovnice vedení tepla, obecnější nestacionární rovnice vedení tepla je pak parabolického typu [10].

Uvažujeme-li jednorozměrnou nestacionární úlohu vedení bez vnitřního zdroje jako v předchozí kapitole, pak rovnice 2.4 přechází na jednodušší tvar 2.17. :

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2.17).$$

Tato rovnice vyjadřuje např. časově neustálené vedení tepla v tyči konečné délky či vedení nekonečně rozměrnou deskou konečné šířky. V rovnici vedení tepla vystupují vždy materiálové vlastnosti daného objektu. Jejich funkční závislost na proměnných x a t (časová závislost vlastností materiálu v praxi není obvyklá, ale v principu je možná) danou úlohu nijak

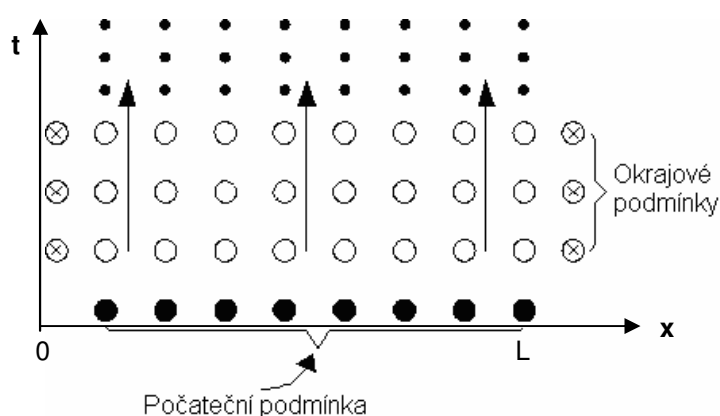
nekomplikuje, ovšem často požadovaná závislost těchto veličin na teplotě je problematická. Tato závislost vede k řešení nelineárních úloh, které jsou obtížně řešitelné. Proto ji např. autor v [10] pro jednoduchost zanedbává.

Provedeme-li nejjednodušší prostorovou diskretizaci diferenční metodou, tj. $x_j = j\Delta x$, kde $j=0..N$; převedeme parciální diferenciální rovnici na soustavu obyčejných diferenciálních rovnic prvního řádu:

$$C(t)\dot{T} + F(t) = K(t)T \quad (2.18).$$

V původní rovnici hledáme jednu funkci $T(x,t)$ na intervalu $\langle 0, L \rangle \times \langle 0, T \rangle$ (obr.2.4), zatímco nová soustava hledá soustavu funkcí $T_i(t)$ definovaných na $N-1$ úsečkách. Tento postup se proto nazývá metoda přímek [10]. Symbol $C(t)$ značí matici tepelné kapacity, $F(t)$ vektor tepelných zdrojů a $K(t)$ matici tepelné vodivosti. Tyto matice mají zajímavé vlastnosti, $C(t)$ je diagonální matice s kladnými prvky na diagonále, $K(t)$ pak třídiagonální, pozitivně definitní, symetrická matice s kladnými prvky na diagonále a nekladnými mimo ni. Rovnice 2.18. se obvykle řeší tzv. θ -metodou, tj. vážený průměr explicitní Eulerovy a implicitní Eulerovy metody:

$$[C^{i+\Theta} + \Delta t \Theta K^{i+\Theta}] T^{i+1} = [C^{i+\Theta} - \Delta t (1 - \Theta) K^{i+\Theta}] T^i + \Delta t F^{i+1} \quad (2.19).$$



Obr. 2.4. Znáznornění časové a prostorové diskretizace, počátečních a okrajových podmínek [4]

Dosazením za $\theta=0$ přejde rovnice (2.19) na explicitní Eulerovy metodu (2.20) (zkráceně EEM), $\theta=1/2$ Crank-Nicolsonova metoda (2.22) (CNM) a $\theta=1$ pak implicitní Eulerovy metodu (2.21) (IEM). Chyba uvedené kombinace diferenční a θ -metody je úměrná $O(\Delta t + \Delta x^2)$ pro $\theta \neq 1/2$ a $O(\Delta t^2 + \Delta x^2)$ pro $\theta=1/2$. Proto se častěji používá Crank-Nicolsonova metoda. Výpočetní schéma EEM je velice jednoduché, ale metoda je jen podmíněně stabilní [4] (2.23). Geometrický význam těchto metod je patrný z obr.2.5. Na obr.2.6. jsou znázorněna numerická řešení 1D úlohy, jejíž analytické řešení bylo uvedeno na obr.2.3, a to pro Dirichletovu, Neumannovu a Newtonovu okrajovou podmínku. Dirichletova podmínka $T_0=0^\circ\text{C}$ (horní řada obrázků) říká, že teplota na okraji (pozn.: $x = \pm 10 \text{ mm}$) je po celou dobu přenosu tepla rovna 0°C . Neumannova podmínka $\dot{q}=75000 \text{ W.m}^{-2}$ (prostřední řada obrázků) předepisuje v celém časovém intervalu konstantní tepelný tok, zatímco Newtonova podmínka $\lambda=1000 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$ (dolní řada obrázků) udává tepelný

tok jako funkci rozdílů teplot horkého tělesa vůči okolnímu chladnému mediu (pozn. čím menší rozdíl teplot, tím menší přestup tepla). Výsledné teplotní pole získané numerickým výpočtem pro Newtonovu okrajovou podmínku lze porovnávat s analytickým řešením téže úlohy (viz. obr.2.3).

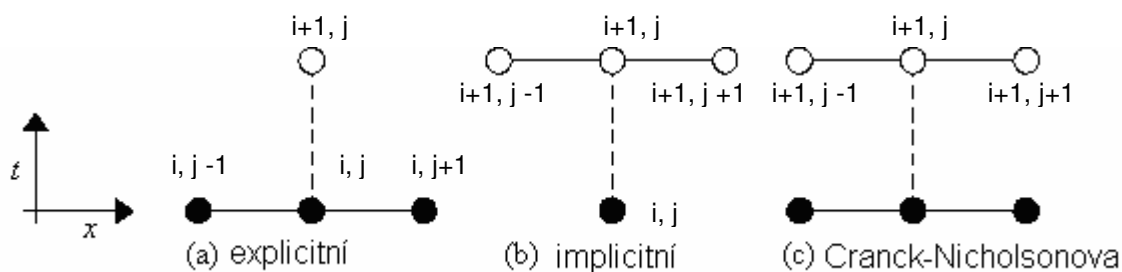
$$\frac{T_j^{i+1} - T_j^i}{\Delta t} = a \left[\frac{T_{j+1}^i - 2T_j^i + T_{j-1}^i}{\Delta x^2} \right] \quad (2.20),$$

$$\frac{T_j^{i+1} - T_j^i}{\Delta t} = a \left[\frac{T_{j+1}^{i+1} - 2T_j^{i+1} + T_{j-1}^{i+1}}{\Delta x^2} \right] \quad (2.21),$$

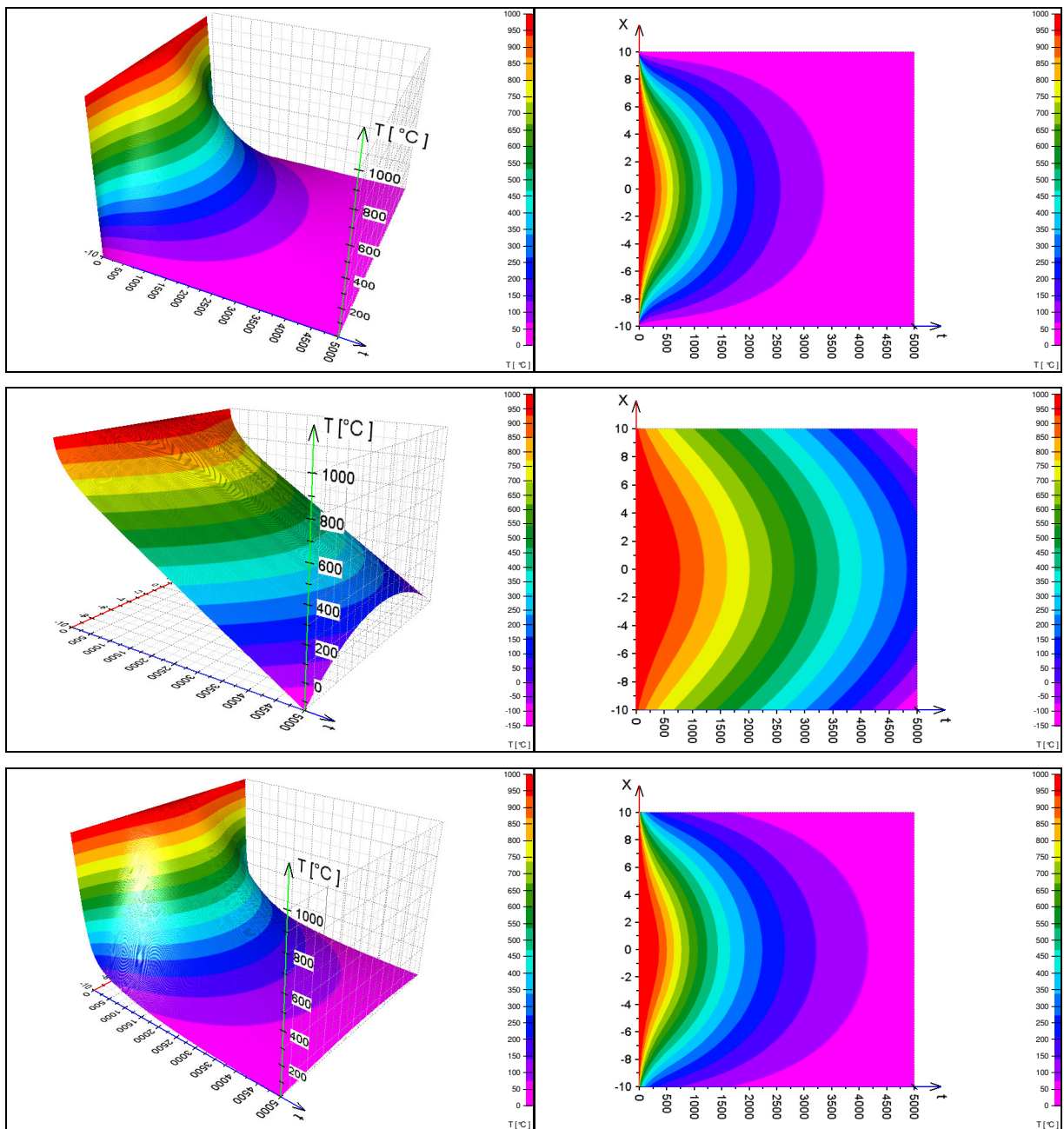
$$\frac{T_j^{i+1} - T_j^i}{\Delta t} = \frac{a}{2} \left[\frac{(T_{j+1}^i - 2T_j^i + T_{j-1}^i) + (T_{j+1}^{i+1} - 2T_j^{i+1} + T_{j-1}^{i+1})}{\Delta x^2} \right] \quad (2.22),$$

$$\Delta t \leq \frac{a}{2} \Delta x^2 \quad (2.23).$$

Ve většině případů řešených v inženýrské praxi se jedná o vícerozměrné úlohy. Převážnou část výše zmíněných metod lze úspěšně použít i pro podobný typ úloh, ovšem s rostoucí dimenzí roste i náročnost algoritmů a výpočtové nároky (čas a výkon počítače).



Obr. 2.5. Znázornění výpočetních schémat pro EEM, IEM a CNM [4]; i časový index, j prostorový index



Obr.2.6. Numerické řešení; 1D úloha vedení tepla s různými okrajovými podmínkami; Dirichletova podmínka $T_0=0\text{ }^{\circ}\text{C}$ (horní řada obrázků), Neumannova podmínka $\dot{q}=75000\text{ W.m}^{-2}$ (prostřední řada obrázků) a Newtonova podmínka $\lambda=1000\text{ W.m}^{-2}.K^{-1}$ (dolní řada obrázků). Na ose t je znázorněn čas v [s], na ose x délka v [mm] a na osa T teplota v [$^{\circ}\text{C}$]

2.6. Inverzní úlohy vedení tepla

Známe-li počáteční teplotní pole uvnitř zkoumaného objektu (počáteční podmínka 2.7) a jsou-li známy potřebné podmínky přestupu tepla přes jeho hranice (okrajové podmínky 2.8-2.11), pak lze určit teplotní pole uvnitř tělesa v libovolném časovém okamžiku. Takováto úloha se nazývá přímá. Přímá úloha postupuje z fyzikálního hlediska od příčiny k důsledku. Příčinou jsou zde průběhy podmínek přenosu tepla a důsledkem pak jsou výsledné změny teplotních polí v tělese. V technické praxi bývá často stanovení okrajových podmínek značně problematické. Obvykle

bývá k dispozici experimentálně zjištěný časový průběh teplot v několika bodech uvnitř tělesa. Úloha, jejímž cílem je výpočet okrajových podmínek ze známého teplotního průběhu uvnitř tělesa, se nazývá inverzní úloha vedení tepla [6]. Pro řešení inverzní úlohy je nutné znát řešení úlohy přímé.

Inverzní úlohy patří do třídy matematicky nekorektních úloh [4 a 6]. To znamená, že u těchto úloh nelze obecně zaručit existenci a jednoznačnost řešení. Inverzní úlohy jsou velmi citlivé na chyby měření a šum. Například je-li naměřená hodnota teploty (nebo derivace teploty podle času) odlišná než jakou může vyvolat libovolná změna okrajové podmínky, pak nelze nalézt řešení inverzní úlohy. Platí, že obtížnost úlohy roste s tím, jak se velikost sledovaných změn měřené teploty blíží k přesnosti měření. Další problémy vyvstávají, je-li úloha nelineární. Obecně platí pro lineární a jednorozměrný případ, že existuje-li řešení inverzní úlohy, pak je současně jediné. Toto naopak neplatí u úloh nelineárních. Bohužel všechny inverzní úlohy stanovení součinitele přestupu tepla jsou úlohy nelineární. Problémy s nekorektností úloh řešil Tikhonov [18] pomocí tzv. regularizační metody tak, aby snížil citlivost metody na chyby způsobené nepřesností měření.

2.7. Jednorozměrná inverzní úloha vedení tepla

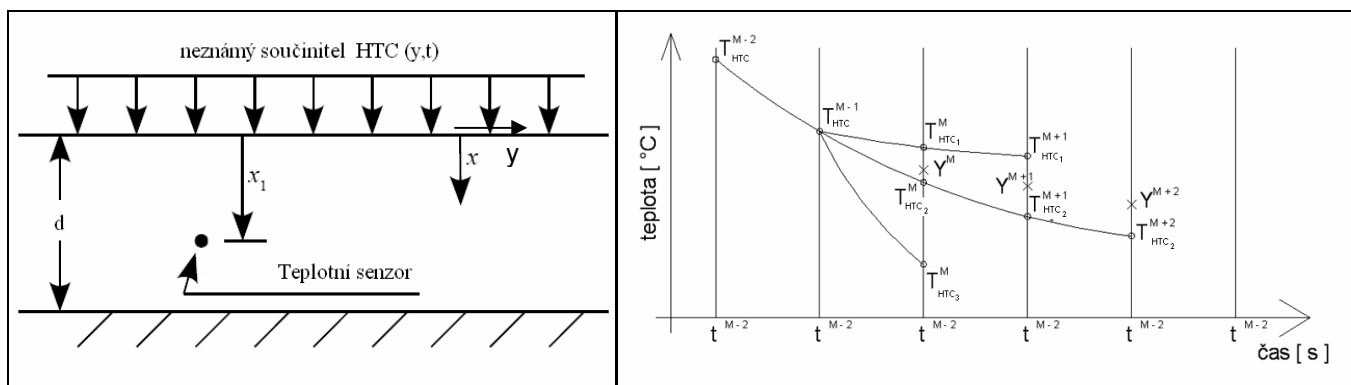
Každá inverzní úloha je založena na řešení úlohy přímé. Přímou úlohu lze řešit mnoha algoritmy. Některé z nich byly popsány výše. Každá taková metoda má své výhody a nevýhody, které musí být brány v potaz při řešení inverzní úlohy. Zejména se jedná o rychlost, stabilitu a přesnost výpočtu a schopnost uvažovat nelinearity. Pro řešení samotné inverzní úlohy se nejčastěji využívá Beckova sekvenčního algoritmu [19].

Předpokládejme znalost experimentálně zjištěného průběhu teploty v bodě x pod povrchem (viz. obr.2.7). Teoreticky lze uvažovat i bod přímo na povrchu. Dále je nutná znalost teplotního pole uvnitř tělesa a součinitele přestupu tepla na povrchu až do časového okamžiku $M-1$. Další podmínkou je znalost derivace teploty podle součinitele přestupu tepla:

$$D_{HTC_{j,l}}^i = \frac{\partial T_{HTC_{j,l}}^i}{\partial HTC_j} \quad (2.24).$$

Komplikovaný systém indexů lze pochopit z obr.2.8., který představuje schéma výpočtu. Index i zde značí dopředný časový krok, j pak představuje počet větví pro odhad neznámého součinitele přestupu tepla HTC a l značí počet měřících míst (v tomto případě jedno). Schéma na obr.2.8. má tedy 3 větve. V první větvi tři dopředné časové kroky, v druhé dva a ve třetí jeden krok.





Obr.2.7. (vlevo) Schéma geometrie pro inverzní výpočet **2.8. (vpravo)** Schéma inverzního výpočtu

Základem Beckova algoritmu [4] je minimalizace čtverců odchylek mezi vypočtenými hodnotami $T_{HTC_j,l}^i$ a hodnotami získanými experimentálně Y_l^i . Hodnota součinitele přestupu HTC minimalizující (2.25) je námi hledaná okrajová podmínka.

$$S = \sum_{j=1}^k \sum_{i=1}^{r_j} \sum_{l=1}^L (Y_l^i - T_{HTC_j,l}^i) w_{j,l}^i \quad (2.25),$$

kde $w_{j,l}^i$ je váha pro danou hodnotu Y_l^i . Nyní derivujeme funkci S podle HTC_j (nahrazuje hledanou hodnotu HTC) a položíme rovnou nule:

$$0 = \sum_{j=1}^k \sum_{i=1}^{r_j} \sum_{l=1}^L (Y_l^i - T_{HTC_j,l}^i) w_{j,l}^i \cdot D_{HTC_j,l}^i \quad (2.26)$$

Dále předpokládáme [6], že v čase M lze závislost T a HTC charakterizovat Taylorovým rozvojem okolo HTC_j :

$$T_{HTC,l}^i = T_{HTC_j,l}^i + (HTC - HTC_j) \frac{\partial T_{HTC_j,l}^i}{\partial HTC_j} + \frac{(HTC - HTC_j)^2}{2!} \frac{\partial^2 T_{HTC_j,l}^i}{\partial HTC_j^2} + \dots \quad (2.27)$$

Po dosazení prvních dvou členů Taylorova rozvoje 2.27. do 2.26. získáme rovnici 2.28., která již hledanou neznámou HTC explicitně obsahuje:

$$0 = \sum_{j=1}^k \sum_{i=1}^{r_j} \sum_{l=1}^L (Y_l^i - T_{HTC_j,l}^i - (HTC - HTC_j) D_{HTC_j,l}^i) w_{j,l}^i \cdot D_{HTC_j,l}^i \quad (2.28)$$

Následně pak lze vyjádřit velikost hledaného součinitele přestupu tepla jako:

$$HTC^+ = \frac{\sum_{j=1}^k \sum_{i=1}^{r_j} \sum_{l=1}^L HTC_j \cdot w_{j,l}^i \cdot D_{HTC_j,l}^2 + \sum_{j=1}^k \sum_{i=1}^{r_j} \sum_{l=1}^L (Y_l^i - T_{HTC_j,l}^i) \cdot w_{j,l}^i \cdot D_{HTC_j,l}}{\sum_{j=1}^k \sum_{i=1}^{r_j} \sum_{l=1}^L w_{j,l}^i \cdot D_{HTC_j,l}^2} \quad (2.29)$$

Řešená inverzní úloha je nelineární i v případě, že materiálové parametry v diferenciální rovnici vedení tepla jsou konstantní. Výpočet tedy probíhá iteračně, dokud neproběhne předepsaný počet iterací, nebo změny hledaného součinitele HTC jsou menší než stanovené kritérium. V tomto okamžiku je položeno $HTC = HTC^+$ a je počítán další krok.

Poznámky: a) Velikost HTC lze počítat i přesnějším způsobem. Např. tak, že do rovnice 2.26. dosazujeme více členů Taylorova rozvoje.

b) Přímý výpočet je nutné provést nejméně pro dvě hodnoty HTC_j tak, abychom měli k dispozici teploty $T_{HTC_1,l}^i$ a $T_{HTC_2,l}^i$ k určení derivace.

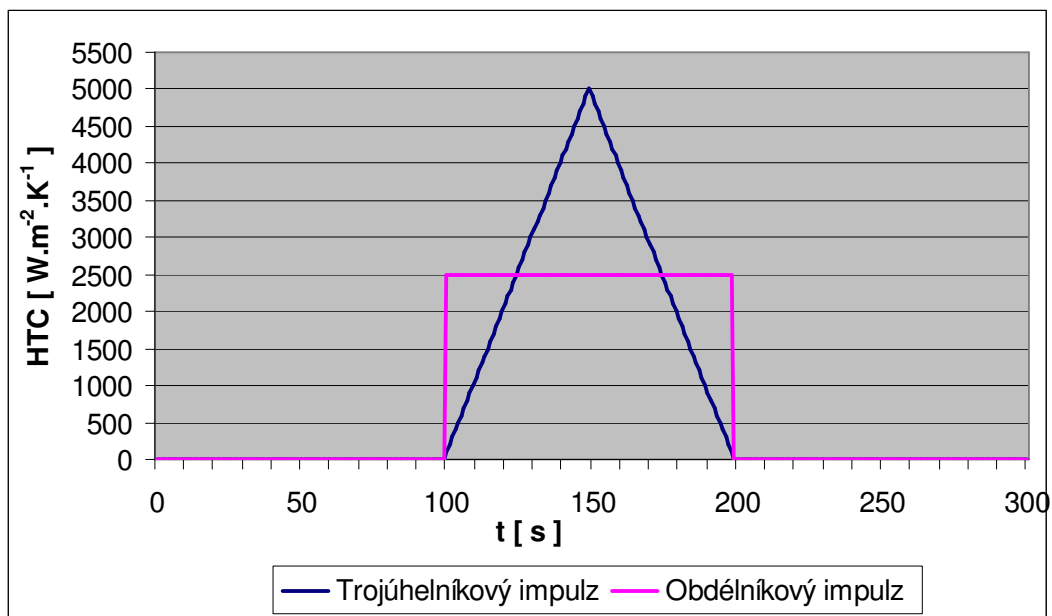
c) Volbu velikosti HTC_j provádíme obvykle tak, že použijeme hodnotu HTC z předchozího kroku $\pm 1 - 10\%$. Dále je vhodné provést kontrolu, zda se velikost experimentálně zjištěné teploty výrazně neliší od vypočtených hodnot.

d) Ukazuje se [20], že volba $r_j > 1$ stabilizuje výpočet a to zejména při prudkých změnách teplot.

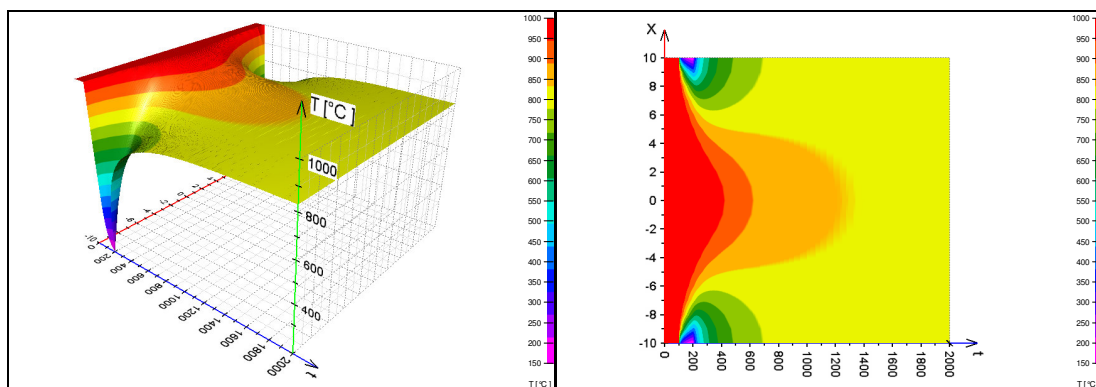
2.8. Testovací úlohy

Vlastnosti inverzní úlohy byly zkoumány na kontrolních příkladech s trojúhelníkovým a obdélníkovým průběhem součinitele přestupu tepla (pozn.: obvyklý tvar je znázorněn na obr.2.9). Nejprve byl proveden výpočet přímé úlohy a to s patřičnou okrajovou podmínkou (pozn.: trojúhelníkový nebo obdélníkový pulz HTC). Teplotní průběh z přímé úlohy byl pak použit pro inverzní úlohu jako vstupní data. Simulována byla obdobná úloha jako v předešlých kapitolách, tj. jednorozměrná deska široká $20mm$, $\lambda=13,75 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$, $\rho=7920 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ a $c=489,85 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$. Vypočtená teplotní pole jsou pro různé okrajové podmínky znázorněny na obr.2.10. (pro trojúhelníkový pulz HTC) a 2.11. (pro obdélníkový pulz HTC). Výsledné rozložení teplot je v obou případech velice podobné, protože impulzy přestupu tepla mají totožný integrální součet HTC. Impulz HTC působil v intervalu 100 – 200s a v tomto čase došlo k poklesu povrchových teplot desky. Současně dochází k vedení tepla z teplejšího vnitřku desky směrem k povrchu. Teplota povrchu se proto s rostoucím časem vyrovnává zbytku desky. V čase 1400s je už teplota celé desky opět homogenní (pozn.: o 200°C nižší než na počátku).

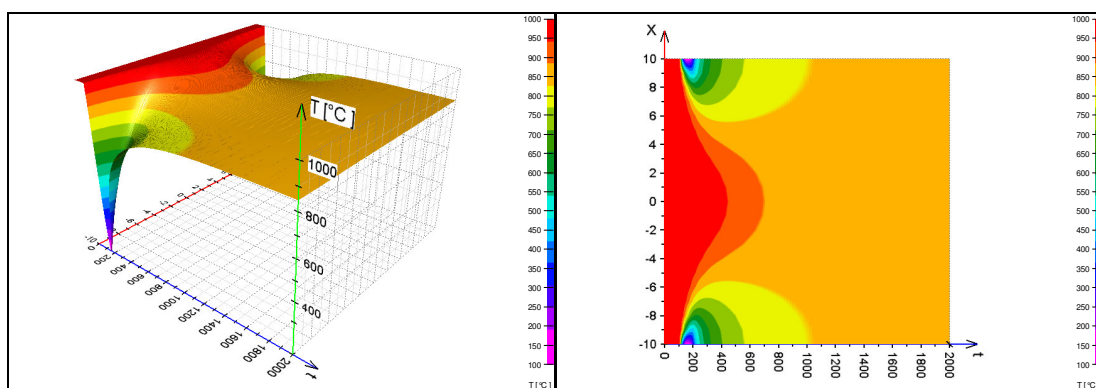




Obr.2.9. Okrajové podmínky – trojúhelníkový a obdélníkový impuls

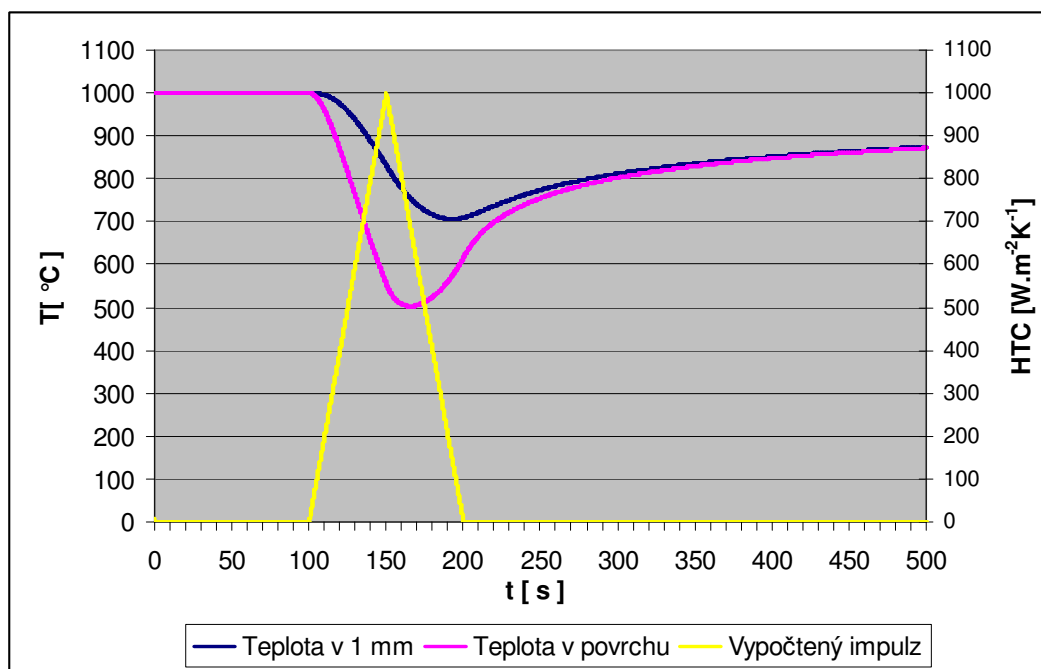


Obr.2.10. Teplotní pole, izometrický pohled a půdorys – trojúhelníkový impuls; osa x délka v [mm], osa t čas [s] a osa T teplota [°C]



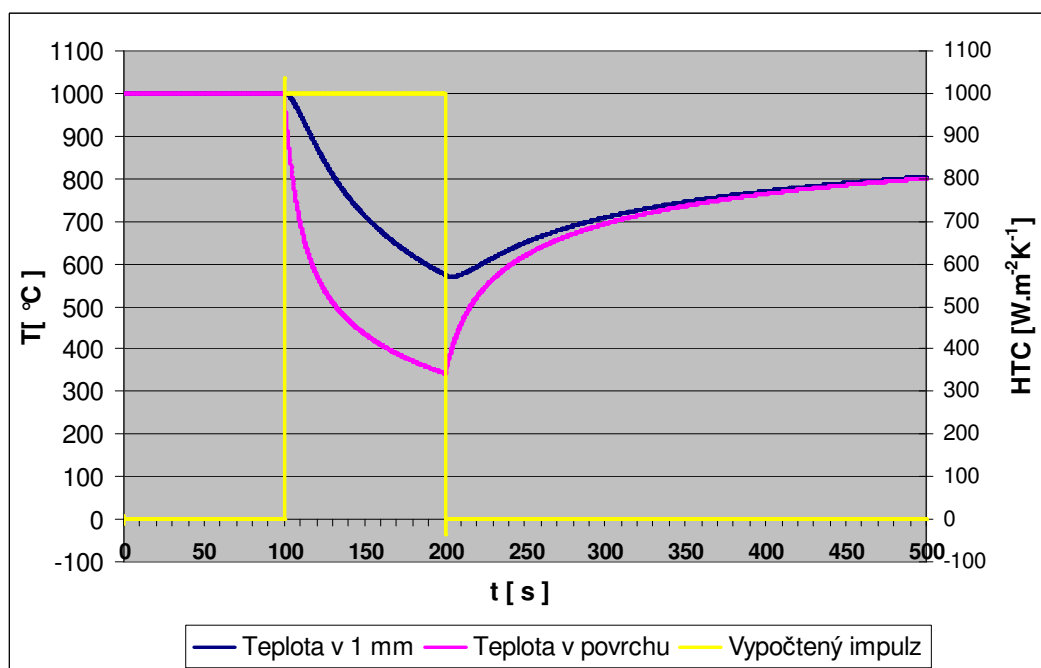
Obr. 2.11. Teplotní pole, izometrický pohled a půdorys – obdélníkový impuls; osa x délka v [mm], osa t čas [s] a osa T teplota [°C]

Na obr.2.12. byl do přímé úlohy aplikován trojúhelníkový impuls součinitele přestupu tepla HTC s maximem $1000 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$, který vyvolal teplotní odezvu na povrchu (růžová křivka) a uvnitř tělesa (modrá křivka; 1mm pod povrchem). Následně pak byl pomocí inverzní úlohy získán původní impuls (žlutá křivka).



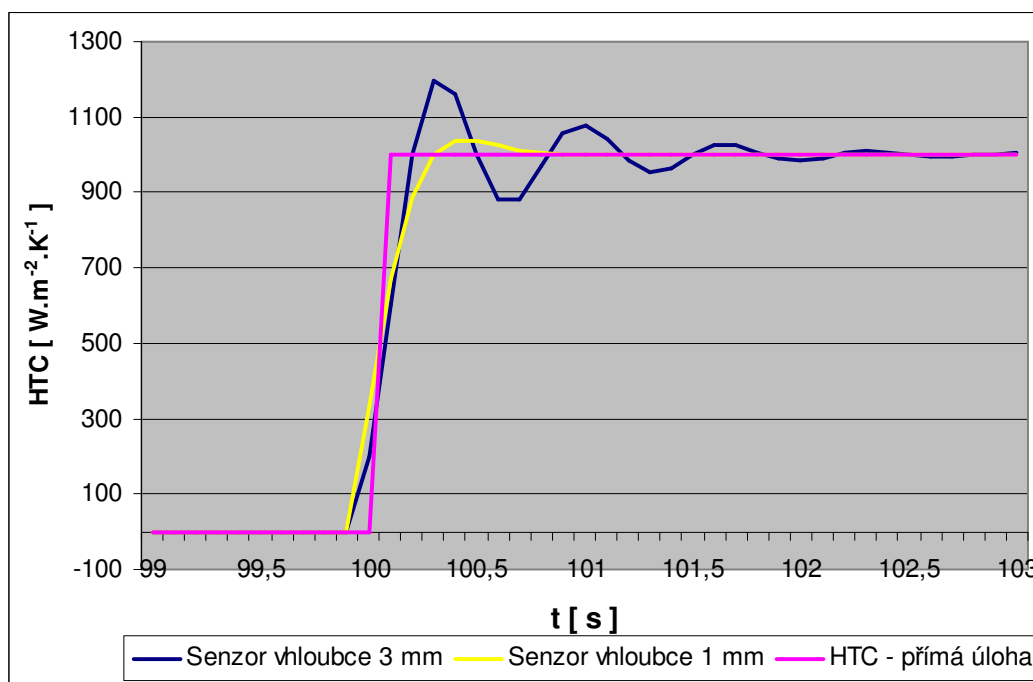
Obr.2.12. Teplotní průběhy získané z přímé úlohy a výsledný trojúhelníkový impuls vypočtený inverzní úlohou

Obr.2.13. pak zobrazuje tentýž proces pro obdélníkový impuls. Oba výpočty byly provedeny s časovým krokem 0,1 s. Zkracování časového kroku vede k zpřesňování výpočtu a to zejména v místech nespojitosti první derivace (náhlé zlomy či skoky). Tyto nepřesnosti jsou patrné zejména na obr.2.13. v rozích obdélníkového impulsu (pozn.: v časovém okamžiku 100s a 200s), kde dochází ke značným zákmitům.



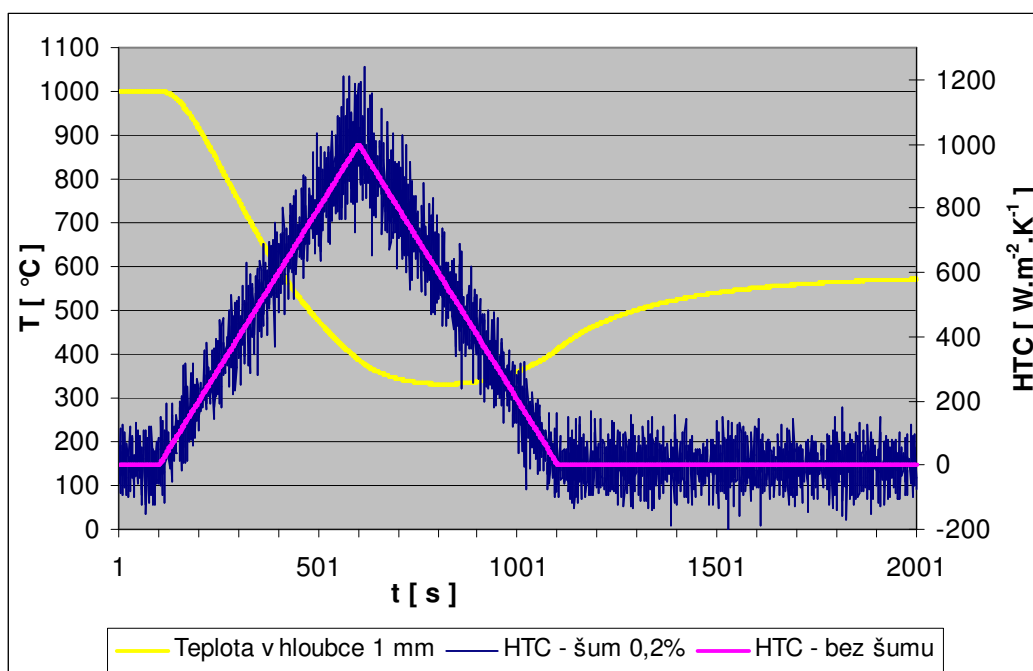
Obr. 2.13. Teplotní průběhy získané z přímé úlohy a výsledný obdélníkový impuls vypočtený inverzní úlohou

Pro další zpřesnění výpočtu je nutno brát v úvahu polohu senzoru, tj. hloubku pod povrchem. Senzor zabudovaný hlouběji reaguje pomaleji než senzor blíže povrchu, což nepříznivě ovlivňuje výpočet. Proto byly provedeny další výpočty s teplotními záznamy z různých hloubek pod povrchem. Konkrétně se jednalo o senzory v hloubce 1 a 3 mm pod povrchem. Obr.2.14. zobrazuje detail grafu HTC v okamžiku 100s. Z grafu je jasně patrná rychlejší odezva a vyšší přesnost senzoru blíže povrchu. Čím blíže umístíme měřící bod k povrchu, tím přesnější výsledky obdržíme. V praxi ovšem narážíme na technické limity během vlastního návrhu a přípravy experimentu. Algoritmus lze stabilizovat i tím, že přidáme více dopředných kroků.

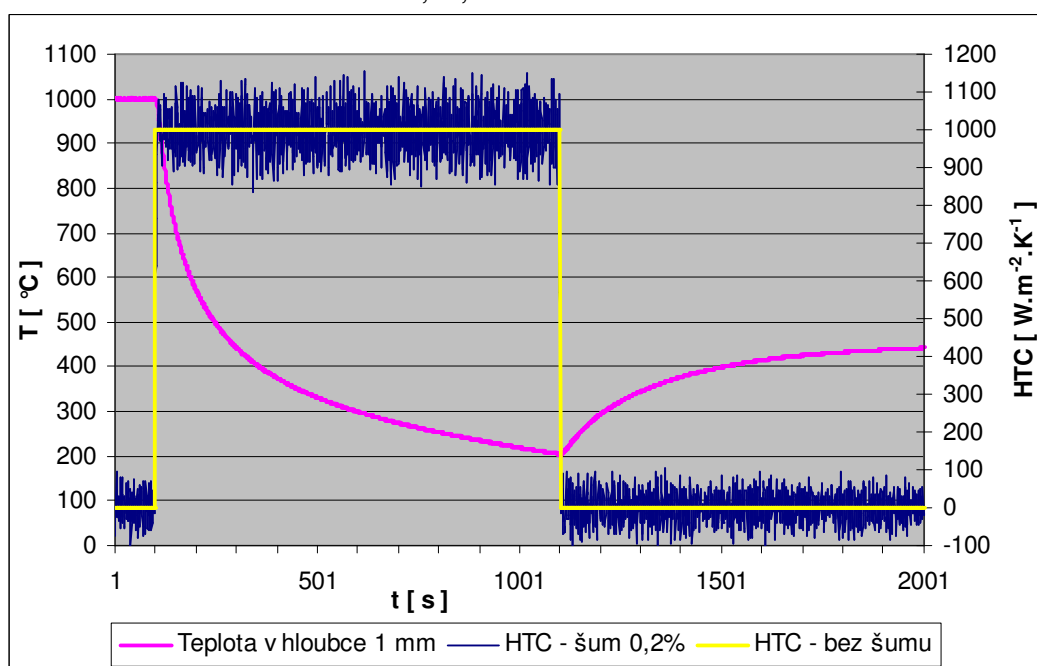


Obr. 2.14. Detail zákmitu obdélníkového impulsu – strmý nárůst; porovnání různých hloubek zabudování senzoru

Jako každý experiment je i měření teploty, v tomto případě pomocí termočlánků zabudovaných do zkoumaného tělesa, zatíženo určitou nepřesností. Takto získaná nepřesnost ve vstupních datech velice nepříznivě ovlivňuje inverzní výpočet [6]. Pro zjištění citlivosti algoritmu na šum v datech byly provedeny simulace, při nichž byly vstupní teploty z přímé úlohy deformovány zavedením náhodné chyby. Nejprve byl do průběhu vstupní teploty v hloubce 1mm přidán šum s normálním rozdělením o velikosti 0,2% (pozn. $\pm 1\text{K}$) a proveden inverzní výpočet s jedním dopředným krokem a časovou diskretizací 0,1s. Výsledné HTC je pak spolu se vstupní teplotou a HTC bez šumu zobrazeno na obr.2.15. HTC s přidáním šumu osciluje nejen okolo původního trojúhelníkového pulzu, ale i okolo osy x a to v místech, kde bylo původní HTC nulové. Podobně byl aplikován šum 0,2% i na vstupní teploty pro obdélníkový pulz HTC (viz. obr.2.16).



Obr.2.15. Průběh teploty s přidaným šumem 0,2 % (žlutá křivka), vypočtené HTC (tmavě modrá) a původní trojúhelníkové HTC (růžová); pozn.: jeden dopředný krok, časová diskretizace 0,1s, hloubka 1mm

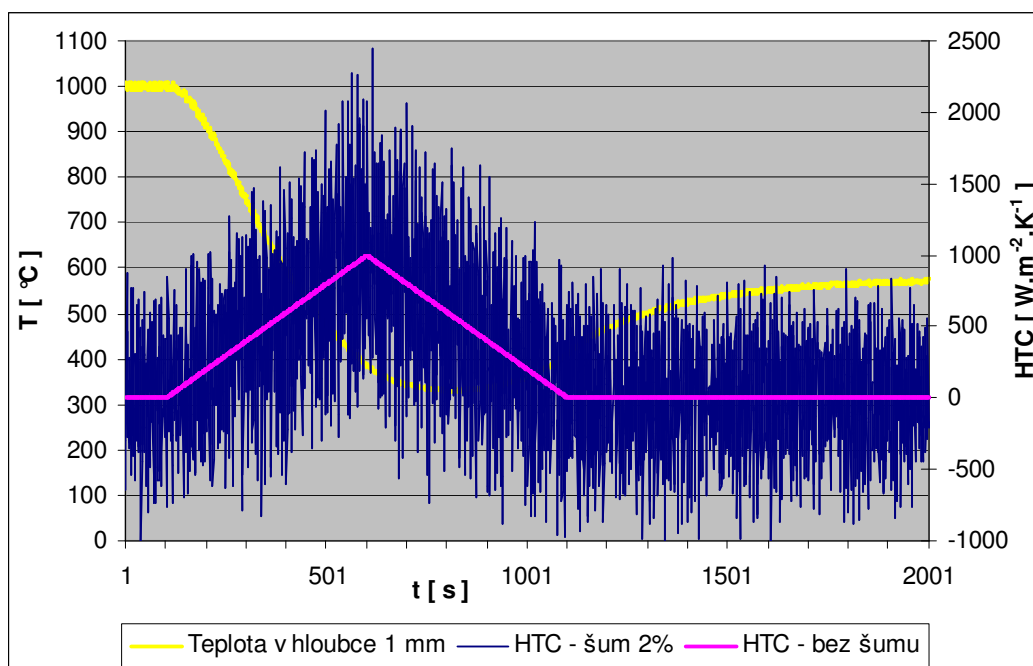


Obr.2.16. Průběh teploty s přidaným šumem 0,2 % (žlutá křivka), vypočtené HTC (tmavě modrá) a původní obdélníkové HTC (růžová); pozn.: jeden dopředný krok, časová diskretizace 0,1s, hloubka 1mm

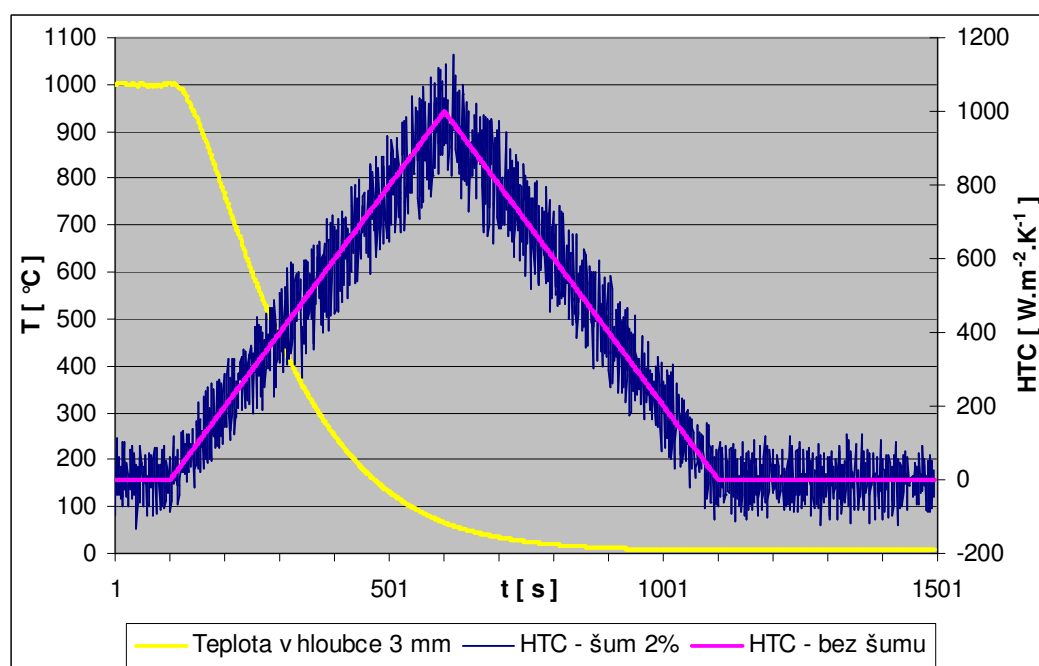
Zvýšíme-li velikost šumu na 2% (pozn. $\pm 10K$) a to při stejném dopředném časovém kroku a stejné diskretizaci, oscilace HTC se výrazně zvýší (viz. obr.2.17). Z dalšího grafu na obr.2.18. je patrný vliv délky dopředného kroku na výpočet se šumem v datech. V této úloze byl použit teplotní záznam z hloubky 3mm s přidaným šumem 2%. Obecně lze tvrdit, že zvyšující se hloubka termočládku od chlazeného povrchu má negativní vliv na přesnost výpočtu. Prodloužením počtu dopředných kroků (pozn.: z jednoho kroku na pět) byly kompenzovány negativní vlivy jak vyšší hladiny šumu, tak i vyšší hloubky termočládku. Platí, že s kratším

časovým krokem a senzorem dále od povrchu se i relativně malá náhodná chyba během výpočtu projeví mnohonásobně více než u delšího kroku a senzoru zabudovaného těsně pod povrchem. Je-li ovšem počet dopředných kroků příliš velký dochází k přílišnému vyhlazování. Oba parametry je proto nutno volit „rozumně“, tak aby zaručovaly dostatečnou přesnost (zejména v bodech nespojitosti první derivace) a zároveň minimalizovaly vliv šumu na výpočet.

Významný vliv na rychlost a přesnost výpočtu rovněž má výpočtové schéma (obr.2.8), odhady součinitele přestupu tepla během výpočtu, počet dopředných kroků a schéma derivace.



Obr.2.17. Průběh teploty s přidáním šumu 2 % (žlutá křivka), vypočtené HTC (tmavě modrá) a původní trojúhelníkové HTC (růžová); pozn.: jeden dopředný krok, časová diskretizace 0,1s, hloubka 1mm

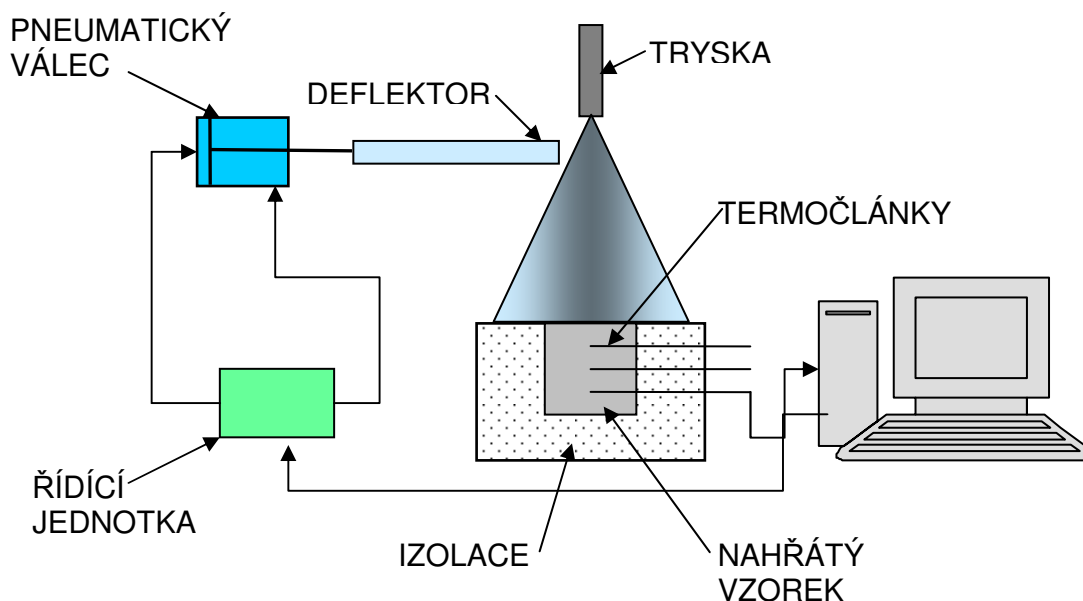


Obr.2.18. Průběh teploty s přidáním šumu 2 % (žlutá křivka), vypočtené HTC (tmavě modrá) a původní trojúhelníkové HTC (růžová); pozn.: pět dopředný krok, časová diskretizace 0,1s, hloubka 3mm

3. Experimentální část

3.1. Experimentální zařízení

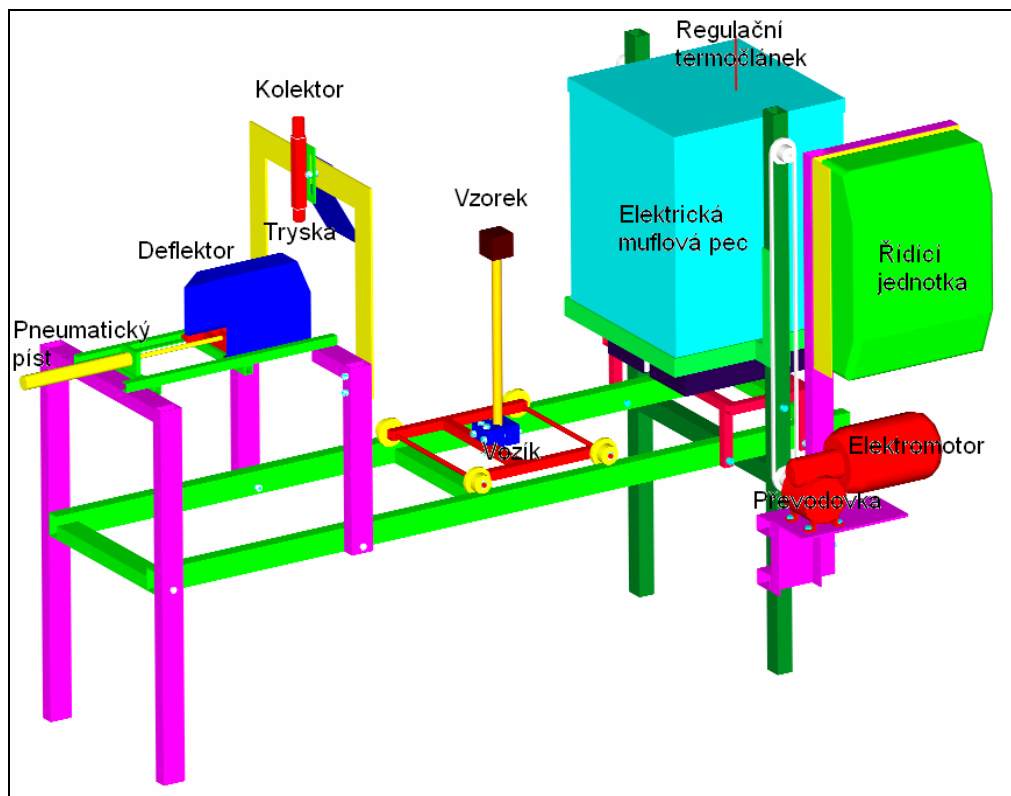
Pro potřeby této disertační práce bylo s pomocí grantu Fondu vědy a výzkumu FSI 2005 [15 a 16] vyvinuto experimentální zařízení. Zařízení je určeno pro výzkum počítačem řízeného chlazení kovových vzorků. Konstrukční návrh byl řešen pomocí programu AutoCAD tak, aby experimentální stand umožňoval co nejširší škálu prováděných experimentů. Obr.3.1. schematicky znázorňuje principiálně funkci zařízen. Nahřátý vzorek je umístěn pod trysku. Proud chladicí kapaliny, který vychází z trysky, je dle potřeby buď směřován na vzorek anebo je vychylován deflektorem mimo. Deflektor je přes řídicí jednotku a pneumatický válec ovládán počítačem. Zkoumaný vzorek je vybaven několika teplotními senzory (pozn.: termočlánek typu K) v různých hloubkách pod chlazeným povrchem. Teplotní záznamy senzorů jsou během experimentu digitálně zaznamenávány. Vzorek je tepelně izolován tak aby docházelo k tepelné výměně zejména přes ostříkávaný povrch.



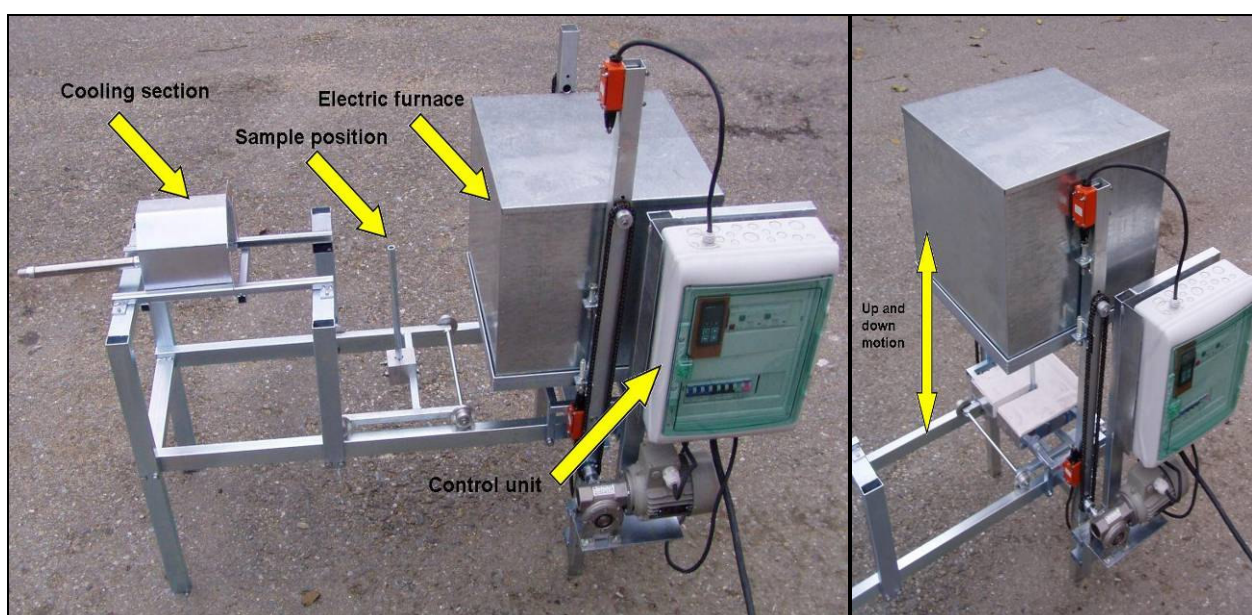
Obr.3.1. Schematické znázornění zařízení

Samotné zařízení a jeho jednotlivé součásti je zobrazeno na obr.3.2. (3D model) a na obr. 3.3. (foto). Zařízení se skládá ze tří částí: ohřívací sekce, chladicí sekce a vzorku, který je pomocí vozíku přemísťován mezi sekcemi. Ohřívací sekce se skládá z elektrické muflové pece zahřívající kovový vzorek do počáteční teploty. Rozsah pracovních teplot je v rozmezí od 0 °C až 1200 °C. Muflová pec je umístěna na tepelně odstíněném polohovatelném rámu. Pohyb rámu pece je vertikální, aby umožňoval umístění a vyjmutí zkoumaného vzorku z pece (detailně viz obr.3.4). Pohyb pece je zajišťován elektromotorem přes mechanickou převodovou skříň a manuálně řízen kontrolní jednotkou ovládání. V peci je umístěn jeden termočlánek typu K, který

je napojen na číslicový regulátor pece. Tento regulátor je plně programovatelný a umožňuje aplikovat celou řadu ohřívacích režimů. Zařízení umožňuje experimenty i se vzorky v ochranné inertní atmosféře (např.: dusík či argon).



Obr.3.2. 3D model laboratorního standu (AutoCAD 2002) zobrazuje jednotlivé součásti zařízení; ohřívací sekce obsahuje muflovou pec, řídicí jednotku a zvedací ústrojí; chladicí sekce obsahuje trysku, deflektor a pneumatický píst; vzorek umístěný na vozíku je převážen mezi sekcemi



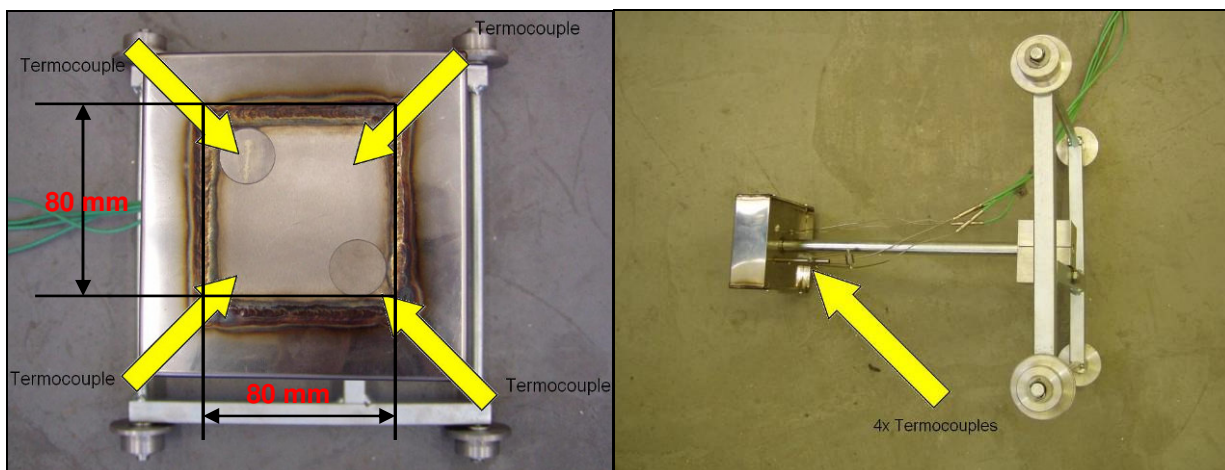
Obr.3.3. (vlevo) a 3.4. (vpravo) Vlevo je celkový pohled na stand; vpravo je znázorněn zdvih muflové pece

Chladicí sekce, která se nachází naproti ohřívací sekci, je navržena tak, aby umožňovala experimenty s malými vzorky (pozn.: do objemu 1000 cm^3). Chladicí sekce se skládá z rámu, na němž je připevněna tryska (pozn.: vodní nebo vodo-vzdušná), a pohyblivého deflektoru. Deflektor chladicí sekce (viz. obr.3.5 a 3.6) má dvě krajní polohy – otevřeno (propouští vodní proud) a zavřeno (voda je odrážena mimo chlazený vzorek). Pohyb deflektoru je zajišťován tlakovým vzduchem přes přepínač a pneumatický píst. Takto lze realizovat libovolný průběh chlazení (pozn.: chlazení může být nepřetržité nebo přerušované s různými časovými prodlevami). Součástí zařízení je čerpadlo, které spolu s nádrží na chladicí kapalinu tvoří uzavřený chladicí okruh. Chladicí okruh umožňuje použití různých druhů chladiv (např.: voda, olej, emulze). Během měření je neustále kontrolován a snímán tlak a průtok vody (eventuálně i vzduchu) proudícího v chladicím okruhu. Po připojení odnímatelného topného tělesa zařízení umožňuje i experimenty s přehřátou chladicí látkou.



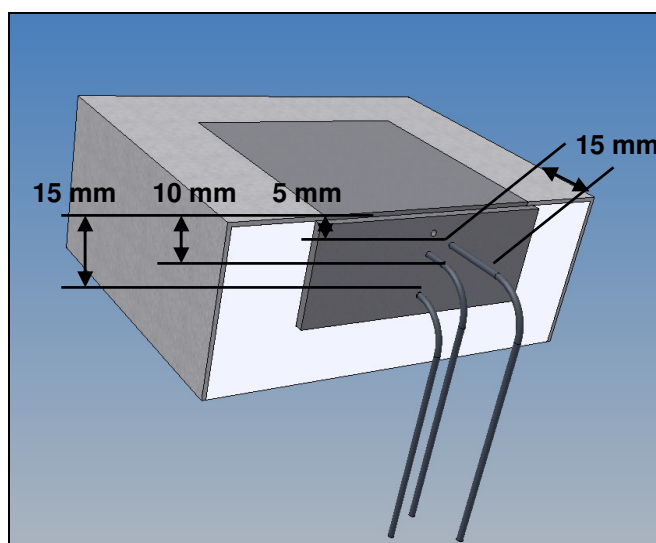
Obr.3.5. a 3.6. Pohled do chladicí sekce během ostřiku – deflektor je otevřen (vlevo) a zavřen (vpravo)

Třetí část tvoří testovaný vzorek, který je znázorněn na obr.3.7. Testovací vzorek je umístěn na pohyblivém vozíku. Pro potřeby této disertační práce byly připraveny dva typy vzorků. Vzorek A je vyroben z austenitické oceli o rozměrech $80 \times 80 \times 25\text{ mm}$. Vzorek je vybaven sadou senzorů měřících teplotu. V tomto konkrétním případě se jedná o čtyři různé senzory běžně používané na jiných aplikacích v LPTaP (detailně viz. kap.3.3). Použitelnost jednotlivých senzorů a jejich vhodnost pro různé experimenty je jedním z cílů této práce. Pokusy s těmito senzory byly využity k jejich vzájemnému porovnání a vytvoření matematického aparátu pro vzájemný přepočet. Základem každého senzoru je vždy jeden termočlánek typu K ($\Phi\ 0,5 - 1,5\text{ mm}$). Rozdílá je však geometrie senzoru a umístění termočlátku. Termočlásky jsou umístěny buď rovnoběžné s isothermami nebo kolmo na ně, a to v různých hloubkách. Tyto rozdíly pak způsobují různou rychlost odezvy na chlazení, různou přesnost a zašumění signálu. Tepelnou izolaci vzorku zajišťuje minerální vata Sibrál (pozn.: tepelná odolnost až do 1450°C). Vzorek spolu s tepelnou izolací je opatřen ochranným opláštěním z nerezového ocelového plechu. Zkoumaný vzorek je dále připevněn na pohyblivém vozíku (obr.3.8), na kterém je převážen během pokusů z ohřívací do chladicí sekce a zpět.



Obr.3.7. a 3.8. Testovaný vzorek A umístěný na vozíku - 4 druh senzorů

Vzorek B je opět vyroben z austenitické oceli V140Ti o rozměrech 60x60x25 mm. Do vzorku byly zabudovány 3 termočlánky – 15 mm do hloubky, v ose vzorku. Termočlánky byly umístěny v izotermách ve třech vzdálenostech od povrchu – 5, 10 a 20 mm (obr.3.9). Celý vzorek je opět opatřen ochranným opláštěním a sibalovou izolací.



Obr.3.9. Řez vzorkem B – austenitická deska (tmavě šedá část) se 3 zabudovanými termočlánky, opláštění vzorku (světle šedá část) a sibalová izolace (bílá část)

Změřená data jsou během experimentu zaznamenávána a uchovávána v data loggeru HT800 (viz. obr.3.10). Data logger s kapacitou interní paměti 8 MB umožňuje snímat až 16 kanálů různými vzorkovacími frekvencemi až do 450 Hz. Při měření se využívá pouze 5 kanálů (pozn.: vzorek A: 4 senzory uvnitř vzorku a termočlánek snímající teplotu chladicí kapaliny; vzorek B: 3 senzory uvnitř vzorku, jeden termočlánek snímající teplotu chladiva a jeden teplotu okolního vzduchu). Obvyklá vzorkovací frekvence činila 300 Hz, což při typické délce experimentu 2 až 4 minuty (pozn.: v závislosti na počáteční teplotě a intenzitě chlazení) představuje přibližně 180000-360000 záznamů. Po skončení experimentu jsou data přenesena do počítače, kde jsou přepočítána pomocí inverzní úlohy a dále vyhodnocována.

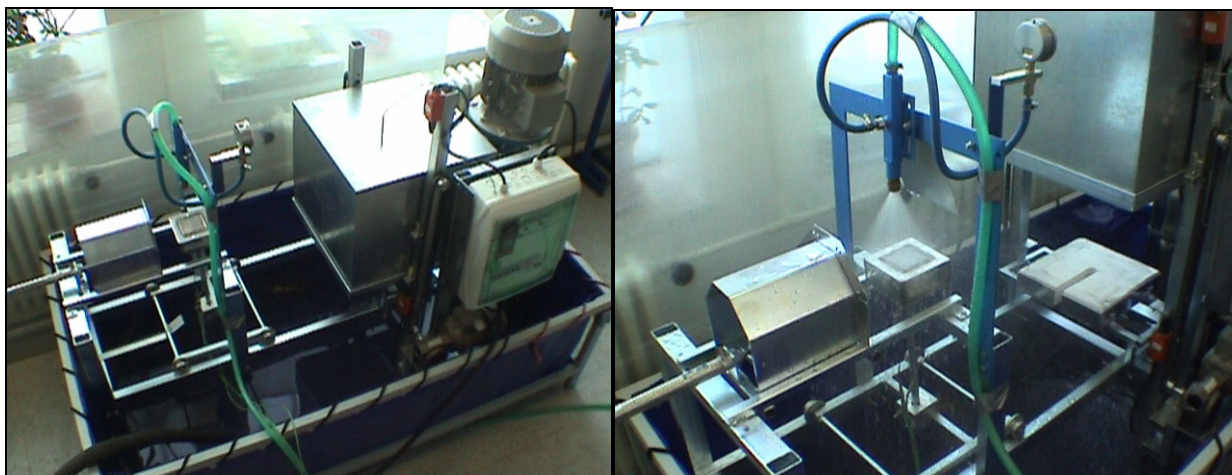
Druhou možností záznamu dat je použití měřicí ústředny (obr.3.11). Měřicí ústředna se skládá ze standardního PC, záložního zdroje UPS, multimetru a elektronické přepínací jednotky Keithley. Ústředna je schopná zaznamenávat data až z 39 kanálů. Zařízení je ovládáno programem TestPoint, v němž je možné vytvářet aplikace pro konkrétní typ měření. Takový program pak zaznamenává data (mV) a přepočítává je na $^{\circ}\text{C}$. Vzorkovací frekvence je opět volitelná a závisí na dynamice zkoumaného děje. Výhodou měřicí ústředny oproti data loggeru je možnost sledovat výsledky měření on-line během experimentu, což nám dává možnost kontroly dat. Nevýhodou jsou větší rozměry a hmotnost. Ústředna také nedovoluje měření s tak vysokými vzorkovacími frekvencemi jako data logger. Je proto vhodnější na dlouho trvající měření.



Obr.3.10. (vlevo) Data logger Ht800

3.11. (vpravo) Měřicí sestava

Postup měření je následující: testovaný vzorek je nejprve zavezen do ohřívací komory a nahřát na požadovanou počáteční teplotu. Startovací teplota se pohybuje v rozmezí 200 až 300 $^{\circ}\text{C}$, ale zařízení umožňuje ohřev až do 1200 $^{\circ}\text{C}$. Data logger je uveden do měřicího módu. Vzorek je poté přesunut do chladicí sekce (obr.3.12). Následuje zapnutí čerpadla a nastavení požadovaného tlaku a průtoku dle experimentálního plánu. Deflektor musí být v zavřené poloze, aby nejprve odrážel chladicí kapalinu. Následuje otevření deflektoru (obr.3.13) a ostřík vzorku. Zařízení umožňuje, díky pneumaticky ovládanému deflektoru, buď nepřerušované chlazení anebo chlazení s přerušováním proudu chladiva. Při přerušovaném (též. řízeném) chlazením je deflektor střídavě přepínán mezi polohou, kdy chladicí kapalinu propouští a nepropouští. Takto může být nastavena libovolná časová konfigurace přerušovaného chlazení.

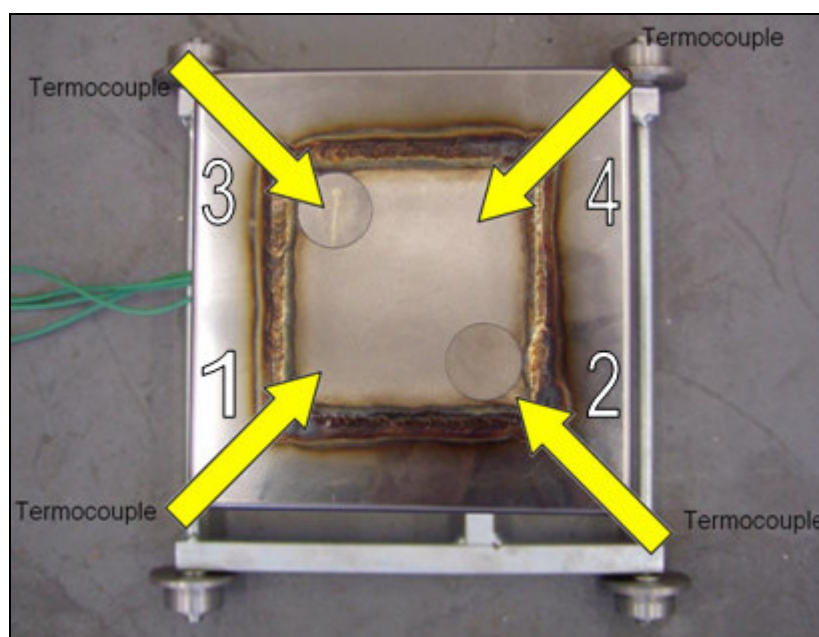


Obr.3.12. (vlevo) Pohled na celý stand při pokusu

3.13. (vpravo) Detail chlazení vzorku kuželovou tryskou

3.2. Charakteristiky použitých čidel

Jak již bylo zmíněno v části 3.1. vzorek A byl osazen 4 typy čidel. Základním prvkem každého čidla je termočlánek. Všechny čtyři typy využívají termočlánky typu K, liší se ovšem průměrem drátu termočlánku a jeho zabudováním pod povrch vzorku. Pro jednoduchost v dalším textu označme jednotlivá čidla čísla 1 až 4 (viz. obr.3.14). Každý jednotlivý senzor ve vzorku odpovídá senzoru používanému při experimentech v Laboratoři přenosu tepla a proudění. Po provedení celé série měření byly senzory a termočlánky důkladně prozkoumány, zejména s ohledem na jejich vnitřní geometrii a fyzické rozměry. Takto získané hodnoty byly použity pro zpřesnění inverzního výpočtu.

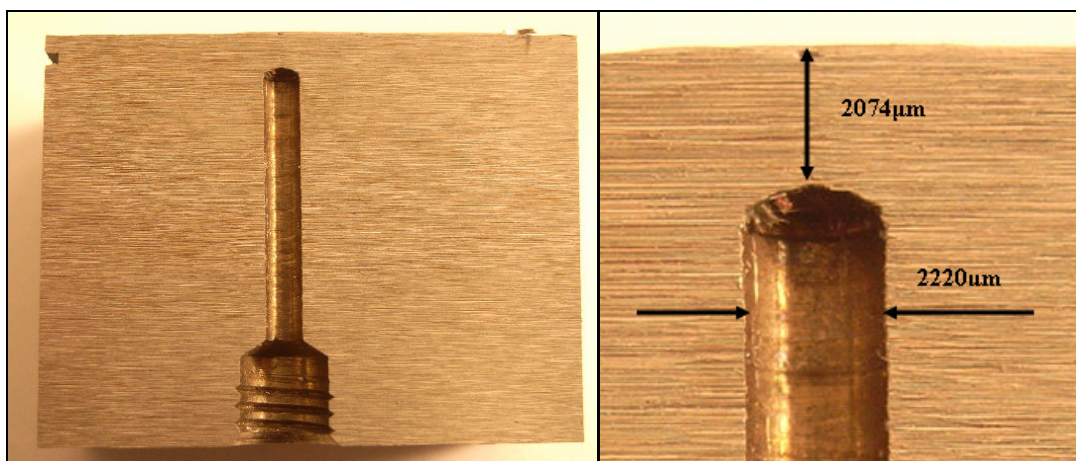


Obr.3.14. Pozice a označení čidel na vzorku A

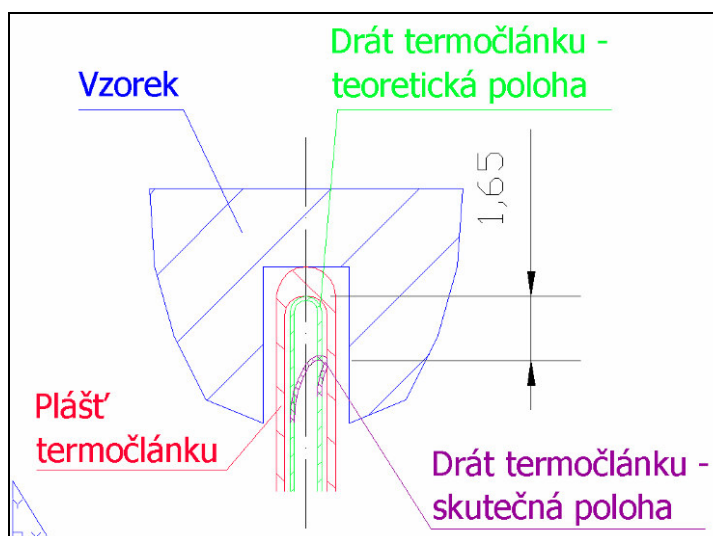
Senzor č. 1 :

Způsob zabudování odpovídá termočlámkům v desce při měření intenzity sprchového chlazení povrchu pro stanovení chladicích účinků trysek v oblasti sekundárního chlazení kontinuálního lití. Termočlánek typu K o průměru 1,5 mm je osazen v otvoru vrtaném zespodu desky kolmo k povrchu. Termočlánek je chráněn ocelovou trubičkou a proti vypadnutí je zajištěn přítlačnou pružinou. Tento způsob uložení je opačný proti obvyklému použití v LPTaP na laboratorním zařízení pro měření za vysokých teplot, kdy je termočlánek zabudován shora a je dotlačován ocelovým závažím. Dotlačovací síla odpovídala tíhové síle závaží. Montáž termočlátku zespodu byla vynucena aplikací rozdílných typů senzorů do jednoho vzorku a nemá vliv na měřená data.

Z analýzy provedené po dokončení všech měření byly získány přesné proporce senzoru. Z řezu zobrazeném na obrázcích obr.3.15. a 3.16. byla odečtena vzdálenost čela díry od povrchu 2074 μm a průměr díry 2220 μm . Při zkoumání řezů termočlátku bylo zjištěno, že kulička termočlátku neleží v ose senzoru, ale je vychýlená stranou a směrem dolů od povrchu vzorku, viz obr.3.17. Skutečná poloha kuličky termočlátku leží 1,65 mm pod teoretickou polohou.



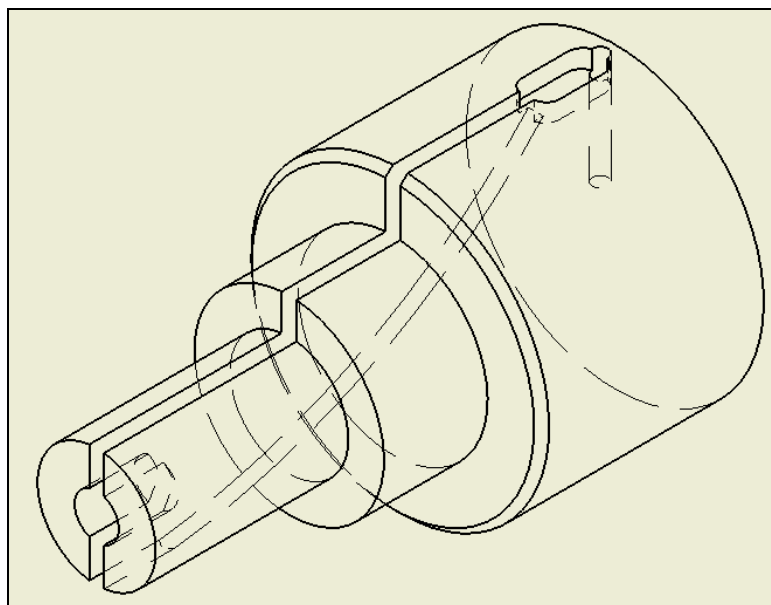
Obr.3.15. a 3.16 Vlevo díra pro zabudování termočlátku, závit pro uchycení ochranné trubičky; Vpravo je znázorněn detail čela díry



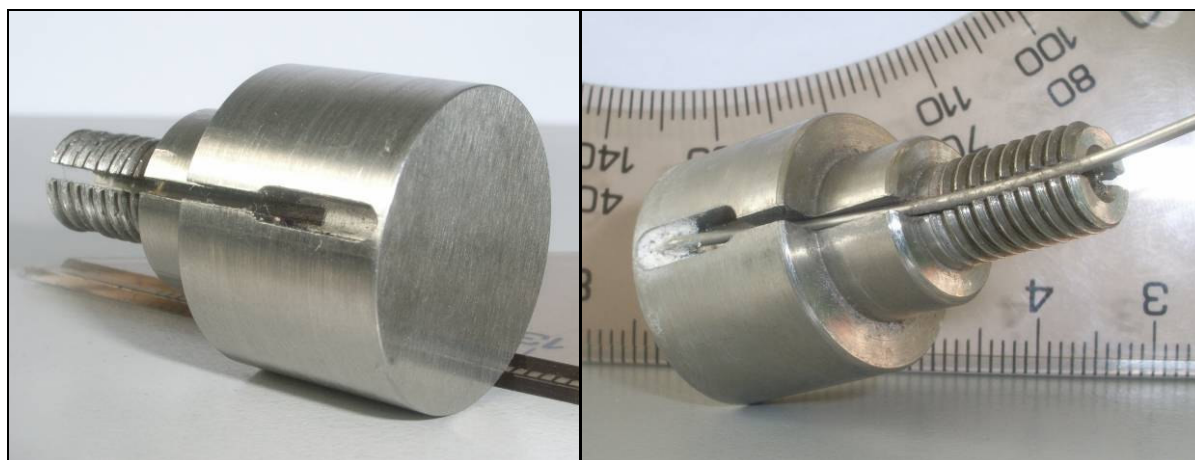
Obr.3.17. Schéma uložení termočlátku

Senzor č. 2 :

Senzor č.2 je válcové čidlo (obr.3.18 a 3.19), určené k zasazení do desky vzorku, je osazené termočlánkem typu K o průměru 1 mm. Termočlánek je umístěn ve vyfrézované drážce, viz.obr.3.20. Drážka končí dírou vrtanou 1 mm pod povrchem (osa díry - povrch) ve směru isoterem. Mezera mezi termočlánkem a dírou je vyplněna teplo-vodivým tmelem. Tento typ senzoru se používá při experimentech na deskách na lineárním standu.



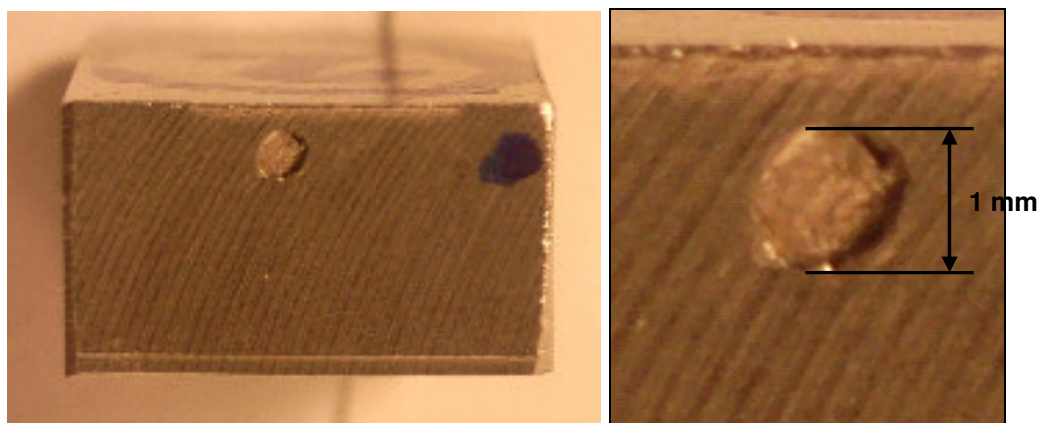
Obr.3.18. Schématické znázornění senzoru č.2, bez zabudovaného termočlátku



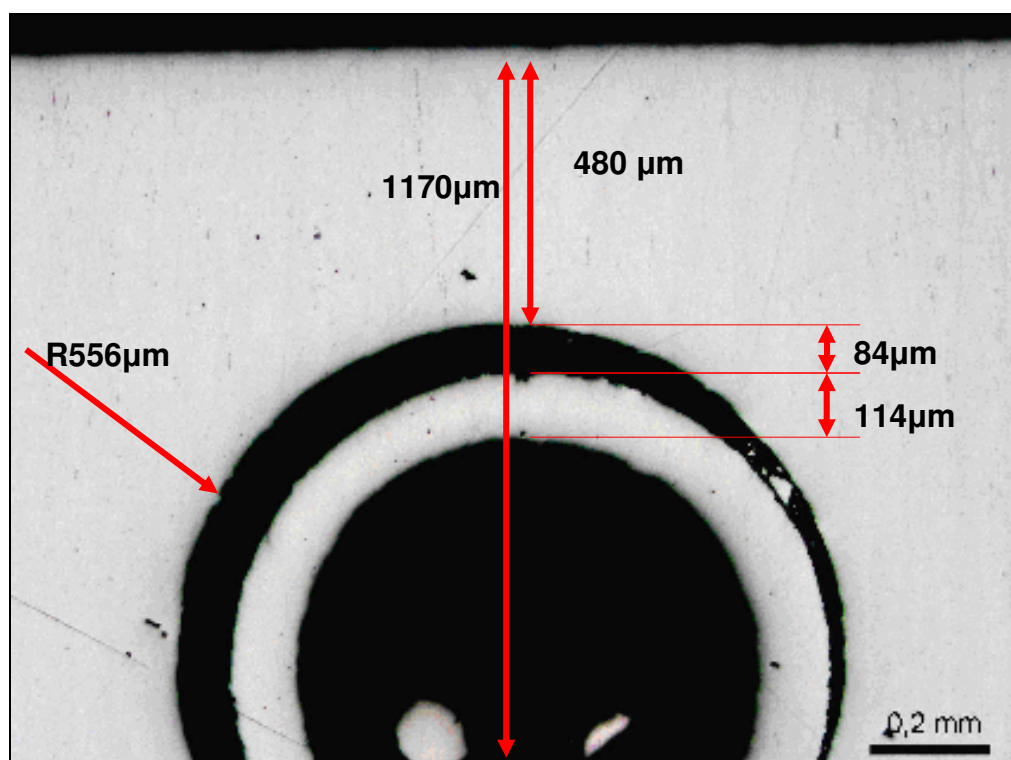
Obr.3.19. a 3.20. Foto senzoru bez zabudovaného termočlátku (vlevo) a po zabudování (vpravo)

Po dokončení experimentální části byl i tento senzor analyzován. Analýza byla provedena v metalografické laboratoři UMI na FSI. Senzor byl nejprve zalit epoxidovou pryskyřicí a rozřezán v několika rovinách kolmých na díru termočlátku (obr.3.21 a 3.22). Po vybroušení byly pod mikroskopem změřeny základní rozměry senzoru (zejména vzdálenost termočlátku od povrchu) a dále byla zjišťována kvalita tmelové výplně. Při následném porovnání naměřených hodnot vůči výkresové dokumentaci bylo zjištěno, že skutečná hloubka díry pod povrchem je 1170 μm (osa díry - povrch) a 480 μm (horní hrana díry - povrch), průměr díry 1112 μm . Tloušťka tmelové

štěrbiny byla změřena jako 84 μm a tloušťka stěny termočlánek jako 114 μm . Vše dobře patrné z následujících obr.3.23.



Obr.3.21. a 3.22. Foto řezu díry pro termočlánek a jeho detail



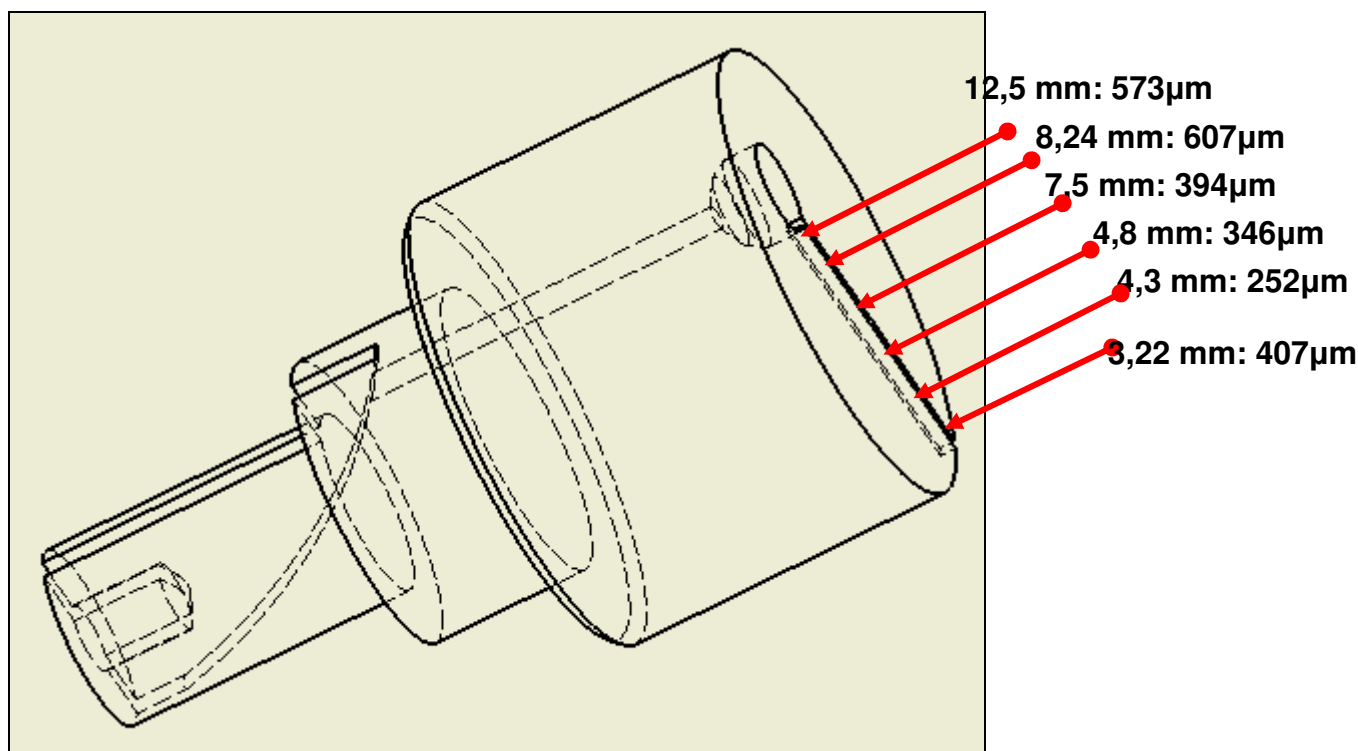
Obr.3.23. Foto řezu díry s termočlánekem včetně vzdáleností od povrchu senzoru; skutečný poloměr díry termočlánek byl 556 μm

Senzor č. 3 :

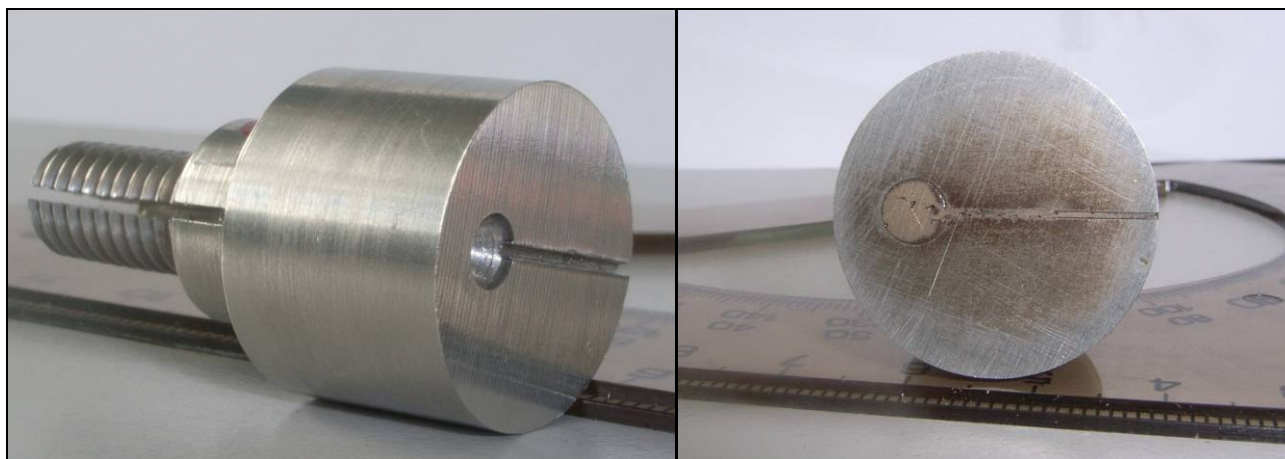
Senzor č.3 je opět válcové čidlo určené k zasazení do ocelové desky (obr.3.24). Na rozdíl od předchozího senzoru není termočlánek zabudován do díry, ale do drážky přímo na povrchu (obr.3.25). Drážka je hluboká 1 mm a je osazena termočlánekem typu K o průměru 0,5 mm. Termočlánek je v drážce zalitý pájkou na bázi stříbra (obr.3.26). Tento typ čidla má nejrychlejší odezvu na změnu teploty povrchu, protože je termočlánek povrchu nejbližší. Podobný typ senzoru se používá při experimentech na bubnu experimentálního standu simulujícím proces chlazení válcovacích stolic při válcování za tepla.

Senzor č.3 byl podobně jako předchozí čidlo analyzován v metalografické laboratoři UMI na FSI. Čidlo bylo opět rozřezáno v několika rovinách. Roviny řezu byly v tomto případě kolmé na drážku s termočlánkem (obr.3.27 a 3.28). Řezy byly provedeny v šesti místech, které byly vzdáleny 3,22 – 12,5 mm od kuličky termočlánku (viz obr.3.24). Cílem těchto měření bylo zjistit, zda je termočlánek v drážce uložen rovnoběžně s povrchem. Dále pak zjištění jak dokonale byla drážka zaplněna pájkou.

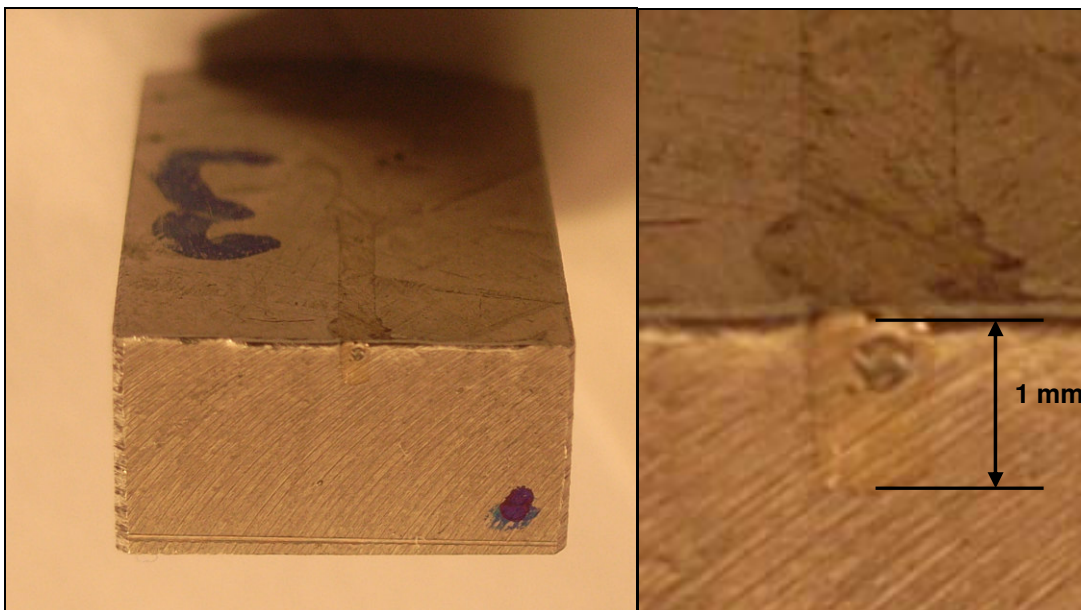
Při zkoumání pod mikroskopem byla změřena vzdálenost středu termočlánku od povrchu senzoru v každém řezu. V řezu ve vzdálenosti 3,22 mm od kuličky termočlánku činila vzdálenost 407 μm , v řezu 4,3 mm 252 μm , v řezu 4,8 mm 346 μm , 394 μm v 7,5 mm a 573 μm v 12,5 mm. Zaplnění drážky pájkou bylo 100%. Vše dobře patrné na obr.3.24 a 3.29.



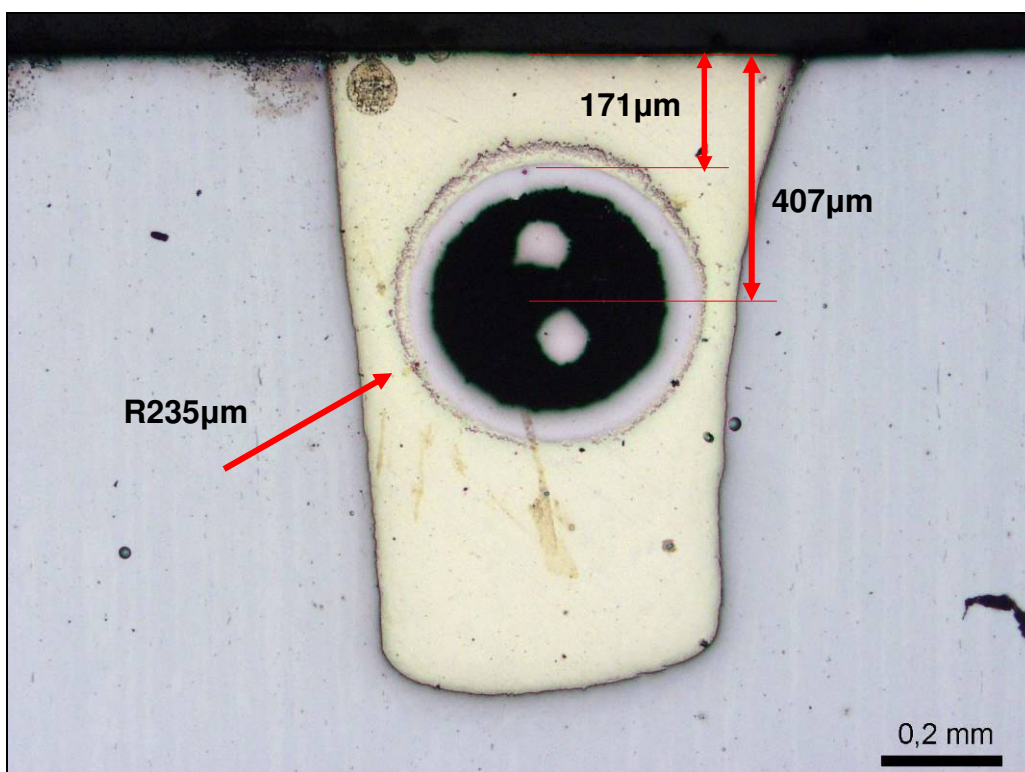
Obr.3.24. Schématické znázornění senzoru č.3, bez zabudovaného termočlánku; kóty označují hloubku zabudování termočlánku v různých řezech



Obr.3.25. a 3.26. Foto senzoru bez zabudovaného termočlánku (vlevo) a s termočlánkem v zapájeném stavu (vpravo)



Obr.3.27. a 3.28. Foto řezu drážky pro termočlánek a jeho detail



Obr.3.29. Celkový pohled na řez senzorem (3,22 mm od kuličky termočlánu) včetně vzdálenosti od povrchu a skutečného poloměru termočlánu

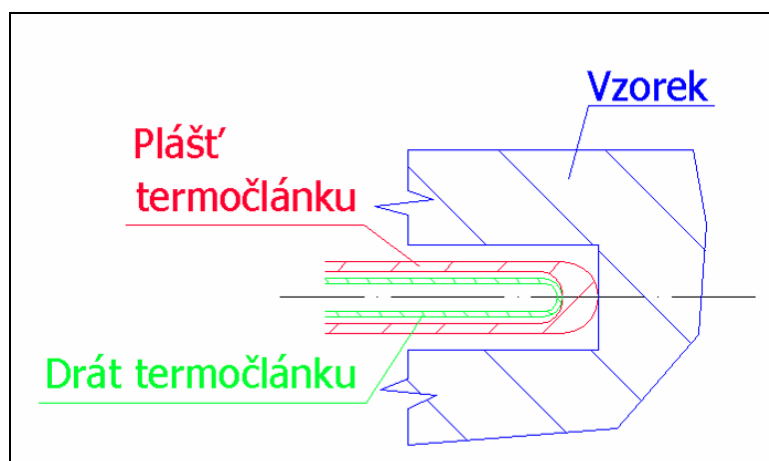
Senzor č. 4 :

Senzor č.4 se skládá opět pouze z termočlánu. Jedná se o stejný typ termočlánu (typ K 1,5 mm průměr) jako v případě prvního senzoru, rozdílné je ovšem umístění termočlánu (viz. obr.3.30). Termočlánek byl zabudován do válcové díry. V tomto případě je díra vrtána rovnoběžně s povrchem vzorku (u prvního senzoru kolmo k povrchu). Tento způsob zabudování byl zvolen proto, aby termočlánek ležel rovnoběžně s předpokládaným směrem isoterem. Osa

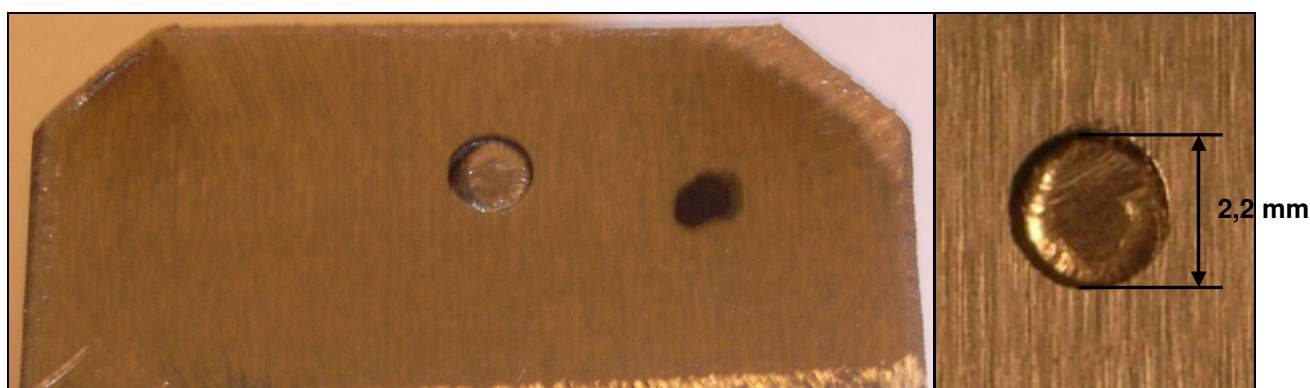
díry se nachází v hloubce 3,6 mm pod povrchem tak, aby se měřící bod nacházel ve stejné hloubce jako u prvního senzoru.

Termočlánek byl do díry zasunut a připevněn k boční stěně vzorku tak, aby kulička termočlánu byla v přímém kontaktu s čelem díry. Tento typ senzoru není používán v LPTaP, měření bylo prováděno s cílem porovnat jej s číslem 1.

Po provedení všech experimentů byl i senzor č.4 důkladně analyzován. Senzor byl rozřezán kolmo na směr zabudování termočlánu. Čelo díry na, které byl dotlačován termočlánek je zobrazeno na obr.3.31 a 32. Další řezy vzorkem byly určeny pro měření skutečných rozměrů. Po zalití do pryskyřice a vybroušení byly zkoumány opět pod mikroskopem (viz. obr.3.33 a 3.34). Měřená byla zejména vzdálenost díry a termočlánu k povrchu vzorku. Skutečná vzdálenost díry od povrchu vzorku činila 2608 μm (horní část díry – povrch vzorku, viz. obr.3.35) zatímco vzdálenost středu termočlánu činila 3557 μm (střed termočlánu – povrch, viz. obr.3.36). Průměr díry je 2,2 mm.



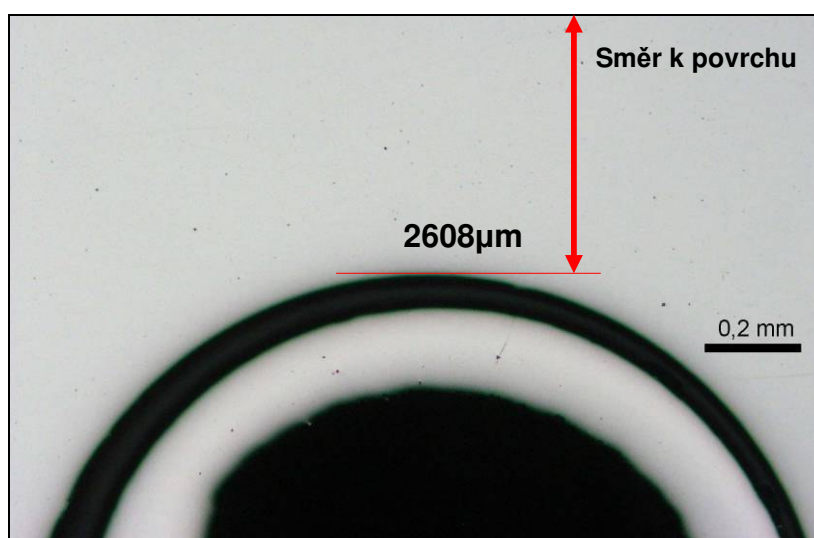
Obr.3.30. Schéma uložení termočlánu v díře rovnoběžně s povrchem



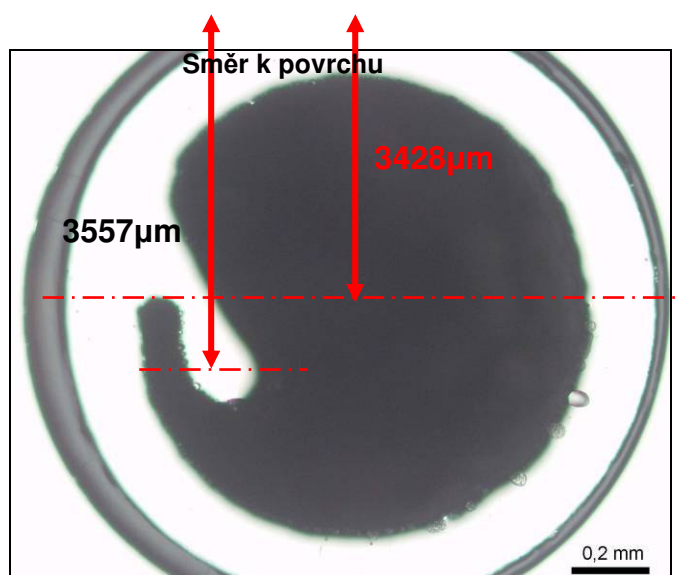
Obr.3.31. a 3.32. Foto řezu čela díry pro termočlánek a jeho detail



Obr.3.33. a 3.34. Foto vybroušeného řezu zalitého v pryskyřici a detailu termočláňku



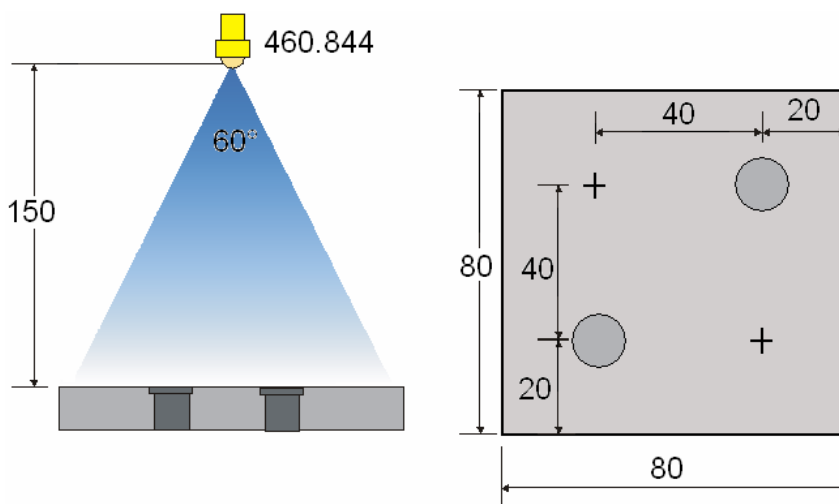
Obr.3.35. Detail horní části díry s termočláňkem; 2,608 mm vzdálenost k povrchu



Obr.3.36. Detail díry se zabudovaným termočláňkem; 3,428 mm vzdálenost osy díry k povrchu; 3,557 mm vzdálenost drátu termočláňku k povrchu

3.3. Experimentální plán

Experimentální plán obsahuje měření (viz. tab.3.1 - 3.3), která byla provedena na výše popsaném zařízení. Všechny experimenty jak se vzorkem A (obr.3.39), tak se vzorkem B byly prováděny jako statické (vzorek se při chlazení nepohyboval) s použitím kuželové trysky Lechler 460.844 s rozstřikovým úhlem 60° . Tryska byla umístěna kolmo 150 mm nad povrchem vzorku. Vzorek byl nahříván na 250°C . Po každém experimentu byl odebrán vzorek chladicí kapaliny k chemickému rozboru. Experimenty se vzorkem A byly provedeny ve dvou časově oddělených sériích. Série měření č.2 měla potvrdit výsledky naměřené v první sérii a zároveň obsahovala nová dodatečná chladiva.



Obr.3.39. Ostřikové parametry a schématické znázornění vzorku A se zabudovanými senzory

Samotné experimenty lze rozdělit do několika skupin dle různých kritérií:

- **Experimenty zkoumající vliv chladicího média:** Cílem bylo zjistit vliv druhu chladiva na účinnost chlazení (pozn. velikost HTC). Pokusy byly prováděny:
 - s **čistou vodou** (pozn.: v tab.3.1 značeny jako PW; PW = Pure Water)
 - se **směsí voda a lubrikantu RM 192** (pozn.: v tab.3.1 značeny jako RM a v tab.3.2 2LC; 2LC = 2.serie Low Concentrations)
 - **voda se směsí rozpuštěných solí $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ + $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$** (pozn.: v tab.3.1 značeny jako TH; TH = Total Hardiness)
 - se **směsí voda a olej Rolkleen DP 2062 – 4S** (pozn.: v tab.3.2 značeny jako 2RDP)
 - s **chladičem pro válcování hliníku Somentor 34** (pozn.: v tab.3.2 značeny jako 2AC; 2AC = 2.serie Aluminum Coolant)
- **Experimenty zkoumající vliv tlaku chladicí kapaliny:** Cílem bylo zjistit vliv velikosti tlaku chladicí kapaliny na velikost HTC. Měření bylo provedeno s čistou vodou (1.série) a chladičem Somentor 34 (2.série). Pro vodu byl proměřen tlakový rozsah 1 – 10 barů,

pro Somentor 34 pak byl proměřen rozsah 1 – 5 barů (pozn.: použité čerpadlo nedokázalo dosáhnout vyššího tlaku při použití toho chladiwa). Experimenty byly v tab.3.1 označeny jako PW1 – PW10 (pozn.: PW1 = Pure Water 1 Bar) a v tab.3.2 označeny jako 2AC1 – 2AC5 (pozn.: 2AC1 = 2.serie Aluminium Coolant 1 Bar)

- **Experimenty zkoumající vliv koncentrace příměsi:** Experimenty s chladiwem RM 192 byly prováděny v rozsahu koncentrací 0,1 až 50 % s cílem kvantifikovat vliv rostoucí koncentrace na HTC. V tab.3.1 jsou tyto experimenty značeny jako RM01 až RM20 (pozn.: RM01 = chladiwo RM 192 koncentrace 0,1 %) a v tab.3.2 pak nesou označení 2LC1 až 2LC10 (pozn.: 2LC = 2.serie Low Concentrations, koncentrace 1%).
- **Experimenty zkoumající vliv tvrdosti vody:** Série experimentů označená jako TH1655 a TH3010 sloužila ke zjištění případného vlivu tvrdosti vody na velikost HTC (pozn.: TH1655 = Total Hardiness 16,55 mmol).
- **Experimenty zkoumající rychlost odezvy jednotlivých senzorů:** Všechny experimenty byly provedeny se vzorkem vybaveným 4 typy senzorů popsanych v kap. 3.3., což umožnilo porovnání jejich přesnosti a reakční rychlosti.
- **Experimenty pro vyhodnocení přerušovaného chlazení:** Přerušované chlazení se skládá z časových intervalů, kdy je vzorek ostříkáván chladiwem a z intervalů, kdy je chladičí proud odchylován mimo. V druhé fázi dochází k vyrovnávání teplotních rozdílů mezi podchlazeným povrchem vzorku a horkým vnitřkem. Experimenty 2.série označené jako 2WP305, 2WP1010 a 2WP530 (pozn.: 2WP305 = 30s chlazení + 5s nechlazení) byly prováděny s čistou vodou, zatímco experimenty označené jako 2AC305 a 2AC101 pak s chladiwem Somentor 34.
- **Experimenty zaměřené na tepelné zpracování materiálu V140Ti:** Experimenty v tab.3.3. označené jako V140AA, V140FA a V140WA byly prováděny na vzorku B (pozn.: ocel označená dodavatelem jako V140).
- **Experimenty porovnávající intenzitu chlazení volným vzduchem, proudícím vzduchem a směsí voda-vzduch:** Chlazení bylo prováděno opět na vzorku B a to nejprve volnou konvekci na vzduchu (pozn.: V140AA = Ambient Air). Následovalo měření s použitím proudícího vzduchu (pozn.: V140FA = Flowing Air) a chlazení vodo-vzdušnou tryskou (pozn.: V140WA = Water + Air).



Tab. 3.1. Seznam experimentů první série se vzorkem A

Čistá voda, 460.844 (60°)					
Název souboru	Výška [mm]	Úhel dopadu	Tlak vody [bar]	Celkový průtok [l/s]	Poznámka
PW1	150	90°	1,0	9,47	
PW3	150	90°	3,0	14,70	
PW5	150	90°	5,0	18,03	referenční
PW7	150	90°	7,0	20,63	
PW10	150	90°	10,0	23,80	
Lubrikant RM 192, 460.844 (60°), 100 l vody (100kg) v chladicím okruhu					
Název souboru	Výška [mm]	Úhel dopadu	Tlak chladiva [bar]		Poznámka
RM01	150	90°	5,0		0,1% (0,1kg)
RM1	150	90°	5,0		1% (1,01kg)
RM5	150	90°	5,0		5% (5,26kg)
RM10	150	90°	5,0		10% (11,11kg)
RM20	150	90°	5,0		20% (25kg)
RM50	150	90°	5,0		50% (100kg)
Směs $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ + $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$, 460.844 (60°), 100 l vody (100kg) v chladicím okruhu					
Název souboru	Výška [mm]	Úhel dopadu	Tlak chladiva [bar]	Celkový průtok [l/s]	Poznámka
TH1655	150	90°	5.0	18,03	Tvrdost vody 16.55 (188,5g + 507,5g)
TH3010	150	90°	5.0	18,03	Tvrdost vody 30.10 (367g + 1015g)

Tab. 3.2. Seznam experimentů druhá série se vzorkem A

Chlazení hliníku Somentor 34, 460.844 (60°), 100 l v chladicím okruhu					
Název souboru	Výška [mm]	Úhel dopadu	Tlak chladiva [bar]		Poznámka
2AC1	150	90°		1	
2AC3	150	90°		3	
2AC5	150	90°		5	
Čistá voda, 460.844 (60°)					
Název souboru	Výška [mm]	Úhel dopadu	Tlak vody [bar]	Celkový průtok [l/s]	Poznámka
2PW1	150	90°	1.0	9,47	
2PW5	150	90°	5.0	18,03	Referenční
2PW10	150	90°	10.0	23,80	
Čistá voda, 460.844 (60°), přerušované chlazení					
Název souboru	Výška [mm]	Úhel dopadu	Tlak vody [bar]	Celkový průtok [l/s]	Poznámka
2WP305	150	90°	5,0	18,03	30s chlazení + 5s nechlazení
2WP1010	150	90°	5,0	18,03	10s + 10s
2WP530	150	90°	5,0	18,03	5s + 30s
Chlazení hliníku Somentor 34, 460.844 (60°), 100 l v chladicím okruhu, přerušované chlazení					
Název souboru	Výška [mm]	Úhel dopadu		Celkový průtok [l/s]	Poznámka
2AC305	150	90°		9,47	30s + 5s
2AC1010	150	90°		14,70	10s + 10s

Lubrikant RM 192, 460.844 (60°), 100 l vody (100kg) v chladicím okruhu				
Název souboru	Výška [mm]	Úhel dopadu	Tlak chladiva [bar]	Poznámka
2LC1	150	90°	5,0	1% (2.02kg)
2LC2	150	90°	5,0	2% (4,08kg)
2LC5	150	90°	5,0	5% (10.53kg)
2LC10	150	90°	5,0	10% (22.22kg)
Rolkleen DP 2062 – 4S, 460.844 (60°), 100 l vody (100kg) v chladicím okruhu				
Název souboru	Výška [mm]	Úhel dopadu	Tlak chladiva [bar]	Poznámka
2RDP2	150	90°	5,0	2.0% (2.00 l)
2RDP4	150	90°	5,0	4.0% (4.00 l)

Tab. 3.3. Seznam experimentů série tepelného zpracování se vzorkem B

Tepelné zpracování materiálu V140 Ti , vodo-vzdušné tryska					
Název souboru	Výška [mm]	Úhel dopadu	Tlak vzduchu [bar]	Tlak vody [bar]	Poznámka
V140AA	N/A	N/A	1,0	0,0	Volný vzduch
V140FA	150	90°	3,0	0,0	Proudící vzduch
V140WA	150	90°	3,0	5,0	Voda + vzduch

3.4. Popis přimíchávaných chemikálií a maziv

Následující text obsahuje základní fyzikálně-chemické vlastnosti použitých chladiv. Nejprve uvádím všeobecné informace pro oleje a emulze. Tyto informace byly získány od dodavatelů. V druhé části této kapitoly uvádím parametry chladiv, které byly získány měřením v LPTaP a následnou chemickou analýzou v laboratoři BFI v Německu.

Esso Somentor 34 je olej primárně určený pro válcování kovů. Tabulka 3.4 uvádí typické vlastnosti tohoto chladiva. Následující text včetně tab.3.4 byl převzat z materiálového listu dodaného výrobcem.

Popis: SOMENTOR 34 je speciálně rafinovaný vysoce jakostní destilační řez minerálního oleje, navržený jako základový olej pro válcování tam, kde je požadován mimořádně vysoký standard čistoty.

Aplikace: SOMENTOR 34 je především vhodný pro válcování hliníkových desek. Umožňuje výbornou tepelnou úpravu bez potřeby předchozího odmaštění.

Výkonnost: SOMENTOR 34 vyhovuje US FDA Regulation 21 CFR 178.3910 a může být tedy použit při válcování hliníkových fólií, používaných jako balicí materiál v potravinářství.

Výhody:

- Umožňuje tepelné úpravy bez předchozího odmaštění
- Nízká odparnost
- Nízký zápach



Tab. 3.4. Typické vlastnosti chladiva Somentor 34

Esso Somentor 34 – typické vlastnosti, metoda zkoumání		
Vzhled	bezbarvý, čirý	vizuálně
Hustota při 15 °C, kg/m ³	820	ASTM D 4052
Kinematická viskozita při 20 °C, mm ² /s	3,6	ISO 3104
Kinematická viskozita při 40 °C, mm ² /s	2,4	ISO 3104
Bod tuhnutí, °C	< -30	ISO 3016
Bod vzplanutí, PM, °C	105	ISO 2719
Obsah popela, % hm	< 0,003	ISO 6245
Obsah síry, % hm	< 0,001	ASTM D 2622
Číslo kyselosti, mg KOH/g	< 0,05	ISO 6618
Destilační rozmezí, °C	239 - 266	ISO 3405

FUCHS Lubritech Lubrodal RM 192 je lubrikant vhodný zejména pro tepelné zpracování ocelí. Tabulka 3.5 uvádí typické vlastnosti tohoto chladiva. Následující text včetně tab.3.5 byl opět převzat z materiálového listu dodaného výrobcem.

Popis: Průhledné žluto-šedé mazadlo pro kování. Při aplikaci je možno ředit užitkovou vodou. Lubrikant je složen ze syntetických i přírodně působících substancí. Vyznačuje se výbornou smáčivostí povrchů a to i za vysokých teplot. RM 192 je určeno k aplikaci sprejem nebo tryskami.

Aplikace: RM 192 je především vhodný pro tváření ocelí a příbuzných slitin za tepla.

Výhody:

- Umožňuje širokou škálu tepelných úprav
- Ekonomický a čistý prostředek
- Všeobecné použití

Tab. 3.5. Typické vlastnosti chladiva Lubrodal RM 192

FUCHS Lubritech Lubrodal RM 192 – typické vlastnosti, metoda zkoumání		
Vzhled	Žluto-šedý, čirý	vizuálně
Hustota při 20 °C, g/cm ³	1,11 ± 0,01	DIN 51757
Dynamická viskozita při 20 °C, mPa.s	400 ± 200	LLS001
pH při 20 °C	9 ± 0,5	LLS013
Bod tuhnutí, °C	0	-
Bod varu, °C	100	-
Životnost nenarušeného balení, měsíc	12	-
Ředidlo/rozpouštědlo	voda	-

Rolkleen DP2062-4S je jeden z řady olejů pro válcování hliníku a mědi za tepla. Využitelný je též pro válcování ocelí za studena. Námi použitý typ je určen pro hliníkové aplikace a zejména pro válcování tyčí.

Výhody:

- Stálý válcovací výkon na všech slitinách
- Výborné mazání



Dalším zdrojem informací o použitých chladivech, kromě materiálových listů, byl chemický rozbor. Před každým experimentem byl z chladicího okruhu odebrán vzorek pro chemickou analýzu. Chemické rozborby byly provedeny pod vedením Dr. Tila Reichardta v laboratořích institutu BFI v Německu. Tato měření byla součástí evropského projektu EWRCOOL. Výsledky rozborů jsou uvedeny v následujících tabulkách a grafech. Tabulka 3.6 obsahuje všeobecné fyzikální vlastnosti zkoumaných chladiv.

Tab. 3.6. Všeobecné fyzikální vlastnosti chladiv

Všeobecné fyzikální vlastnosti chladiv					
Popis vzorku	Skutečná koncentrace [%]	vodivost [mS/cm]	TOC [mg/L]	Obsah oleje [g/kg]	pH
voda (100%)	0,00	0,436 - 0,492	3,9 - 8,4	N/A	6,80
voda (99,9%) + RM192 (0,1%)	0,08	0,74	N/A	N/A	6,80
voda (99%) + RM192 (1%)	0,5 - 0,871	1,455 - 1,79	790,00	N/A	7,10
voda (98%) + RM192 (2%)	1,25	2,42	1640,00	N/A	N/A
voda (95%) + RM192 (5%)	2,00 - 2,558	5,24 - 6,73	4250,00	N/A	7,00
voda (90%) + RM192 (10%)	4,28 - 5,128	9,62 - 12,1	8480,00	N/A	7,00
voda (80%) + RM192 (20%)	12,04	21,40	N/A	N/A	7,70
voda (50%) + RM192 (50%)	48,50	43,00	N/A	N/A	8,10
voda (98%) + Rolkleen DP2062-4S (2%)	N/A	0,41	780,00	1,05	N/A
voda (96%) + Rolkleen DP2062-4S (4%)	N/A	0,40	1080,00	1,22	N/A
Somentor 34 (100%)	N/A	N/A	N/A	650,00	N/A

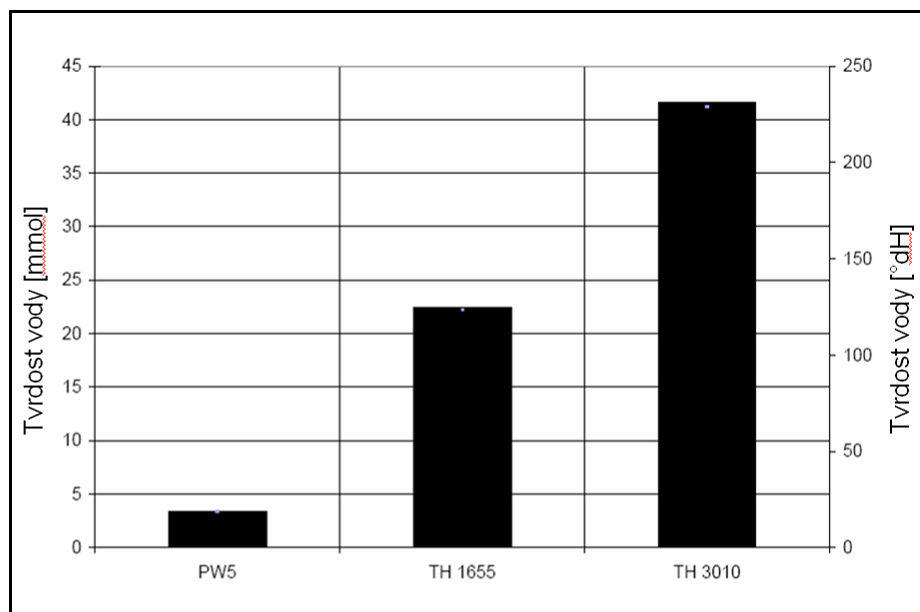
**měřeno při 21-22 °C*

Nejdůležitějším parametrem je skutečná koncentrace. Přestože byly chladicí směsi připravovány s velice pečlivě (pozn.: přesnost použitých digitální váhy < 1g, přesnost odměrných nádob < 0,1L, objem kapaliny v chladicím okruhu 200L) byly naměřeny rozdíly mezi plánovanou a zjištěnou koncentrací. V případě emulze voda-RM 192 byla v nejhorších případech naměřeny téměř poloviční koncentrace (viz. první a druhý sloupec tab.3.6). Důvodem tohoto jevu je špatná rozpustnost zmíněného oleje ve vodě. Při nedostatečném neustálém promíchávání se vytvářela na hladině slabá vrstva nerozpuštěného oleje. Z tohoto důvodu byly všechny experimenty s oleji nebo emulzemi několikrát opakovány a to za stálého míchání. Následující tab.3.7 pak uvádí zjištěné chemické vlastnosti.

Tab. 3.7. Všeobecné chemické vlastnosti chladiv

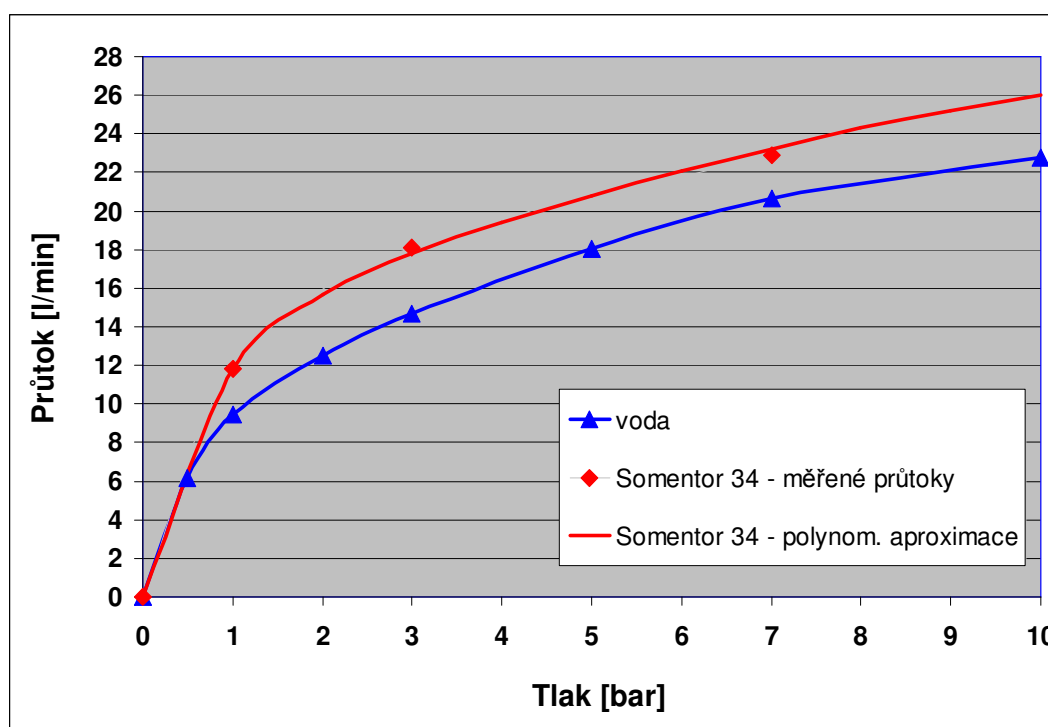
Všeobecné chemické vlastnosti chladiv					
Popis vzorku	fluoridy [mg/L]	chloridy [mg/L]	nitridy [mg/L]	fosforečnany [mg/L]	sulfidy [mg/L]
voda (100%)	N/A	10,10	15,80	N/A	19,90
Tvrdost vody 16,55	N/A	510,00	37,00	N/A	1010,00
Tvrdost vody 30,1	N/A	960,00	37,00	N/A	2010,00
voda (98%) + Rolkleen DP2062-4S (2%)	< 5	26,00	< 5	< 15	63,00
voda (96%) + Rolkleen DP2062-4S (4%)	< 5	26,00	< 5	< 15	62,00





Obr.3.40. Naměřené hodnoty tvrdosti vody, PW5 – užitková voda (zdroj Brno), TH 1655 a 3010 – voda s příměsí solí

Důležitým parametrem zejména pro experimenty s vodou byla tvrdost vody. Graf na obrázku 3.40 zobrazuje naměřené hodnoty tvrdosti (pozn: v mmol a v °dH) pro čistou vodu a pro vodu s rozpuštěným přídatkem minerálních solí. Voda byla použita z vodovodního řádu města Brna. Následný graf na obr.3.41 pak zobrazuje průběh závislosti průtoku na tlaku v chladicím systému pro Somentor 34 v porovnání s vodou. Tato závislost je využita v kapitole 4 při porovnávání HTC v závislosti na tlacích a průtocích.

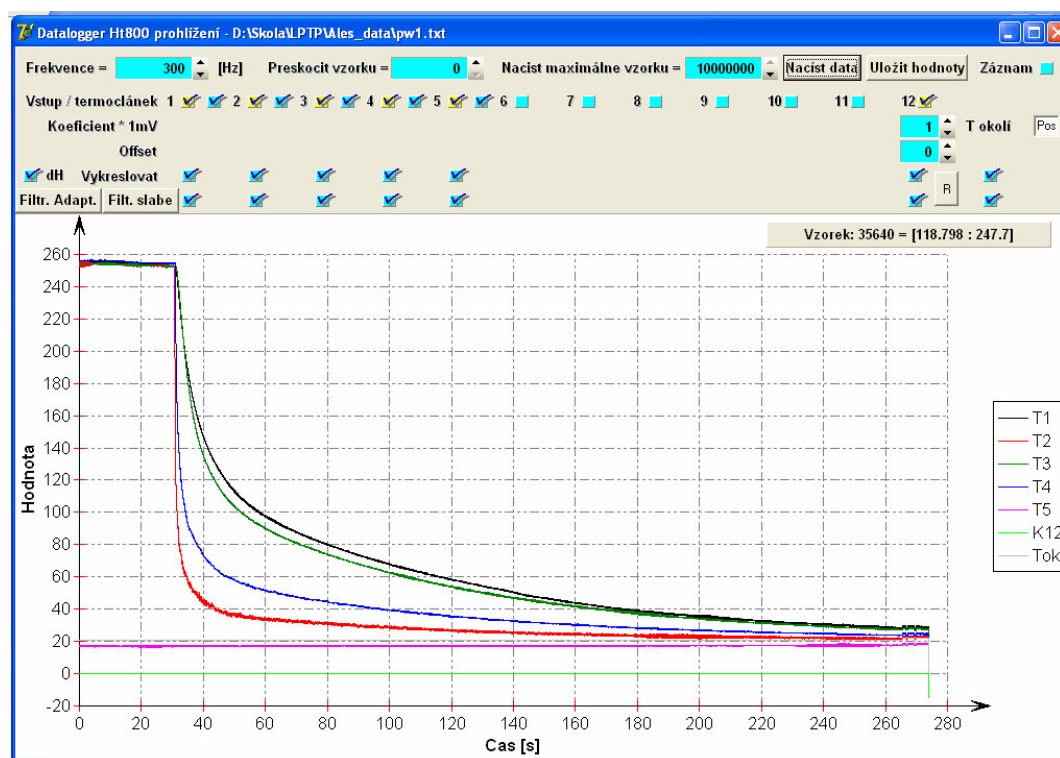


Obr.3.41. Naměřené a teoretické hodnoty tlaku a průtoku chladičů

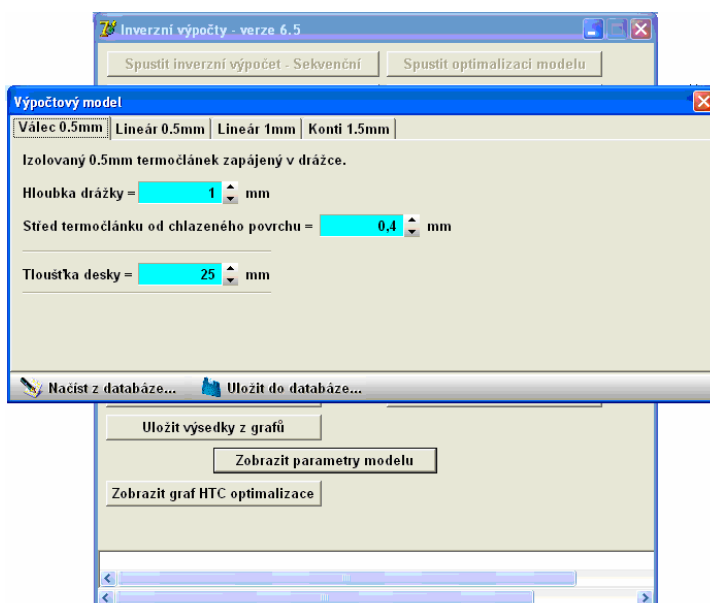
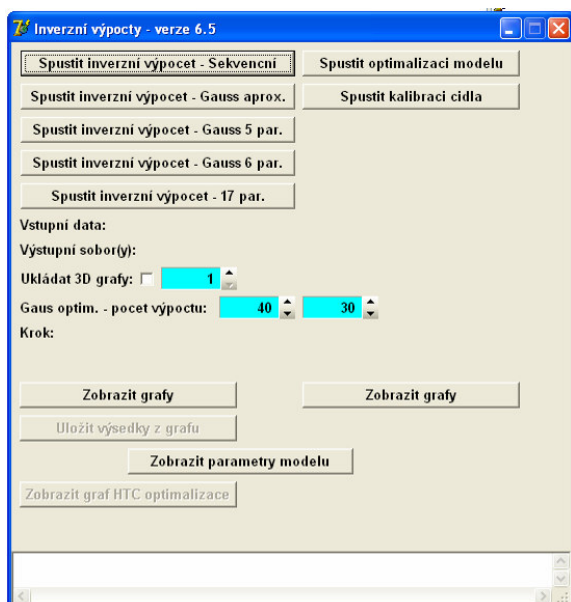
4. Popis výsledků

4.1. Měřená data a postup výpočtu

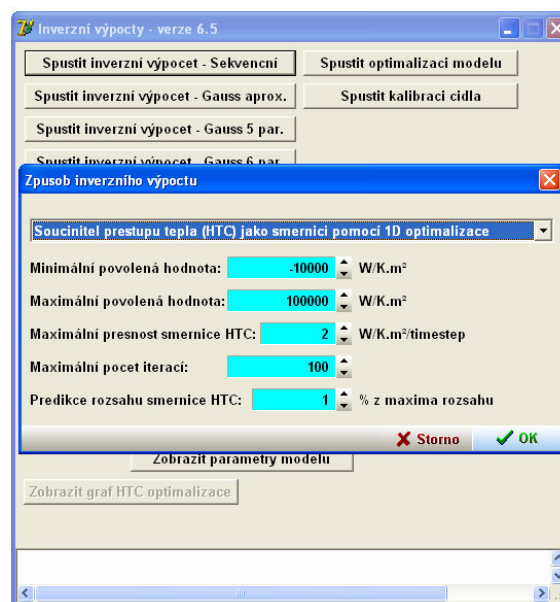
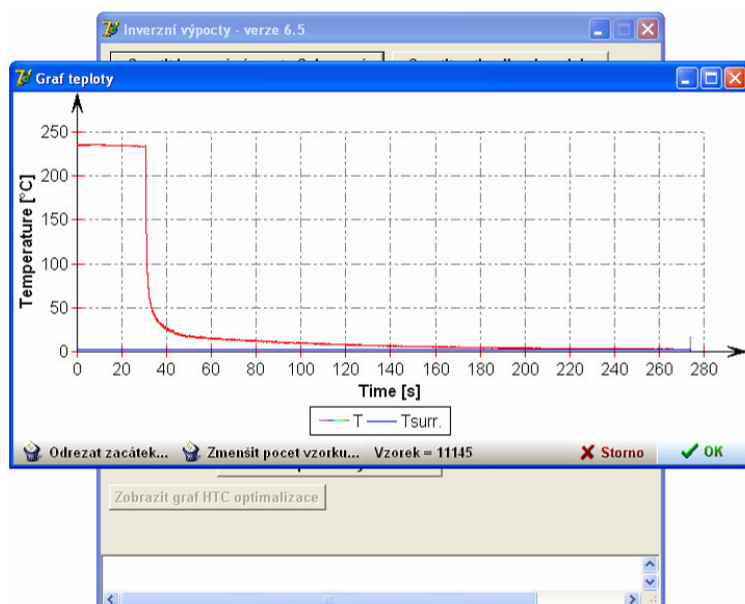
Naměřená data jsou po skončení experimentu stahována z data loggeru za použití speciálního softwaru. Program vytváří dva typy souborů – jeden obsahující vlastní naměřená data a druhý obsahující meta-data (např. vzorkovací frekvenci měření, počet měřících kanálů, datum, čas a počet naměřených hodnot). Oba soubory slouží jako vstup pro další vyhodnocování. Nejprve musí být data přetransformována do podoby vhodné pro inverzní výpočet. K tomuto účelu slouží software (obr.4.1), který navíc umožňuje filtraci šumu v datech. Takto upravená data jsou opět ukládána do .txt souborů. Dalším krokem je pak samotný inverzní výpočet pomocí speciálního programu vytvořeného v rámci [4], viz. obr.4.2-4.5. Po spuštění programu „Inverzní výpočet“ a načtení požadovaného datového vstupu program zobrazí průběh naměřených dat. Před vlastním výpočtem inverzní úlohy je třeba zadat geometrii čidla, omezení výpočtu a nastavení matematického modelu.



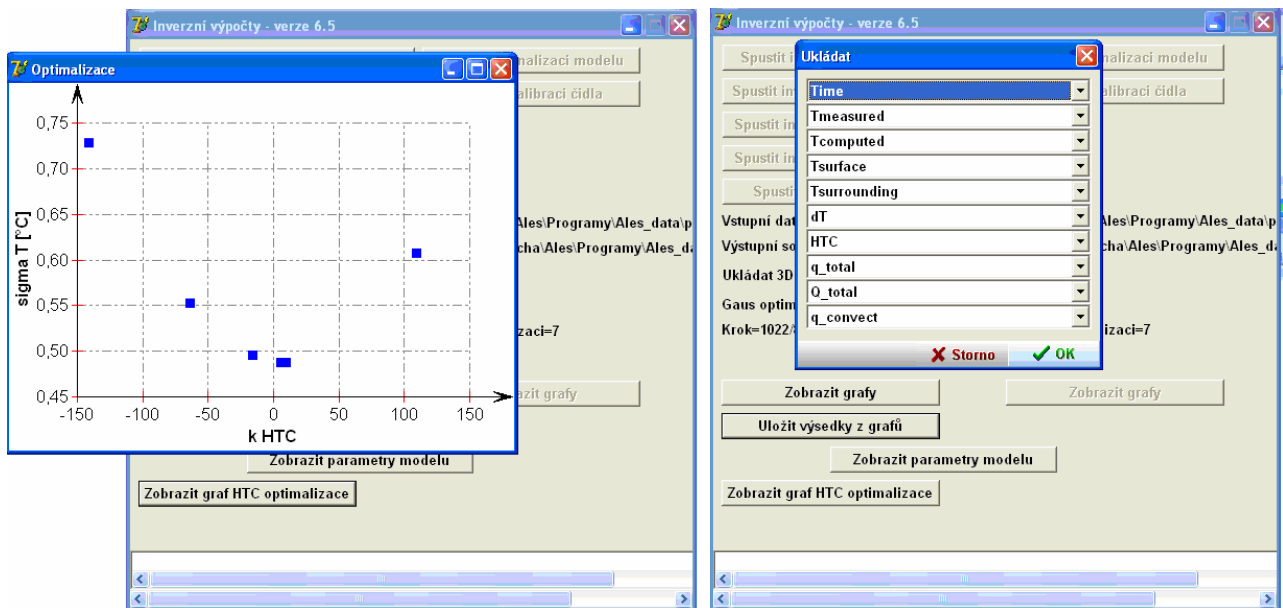
Obr.4.1. Naměřená data: T1 – T4 teploty senzorů 1 – 4, T5 chladivo, K12 neobsazený vstup a Tok teplota okolního vzduchu



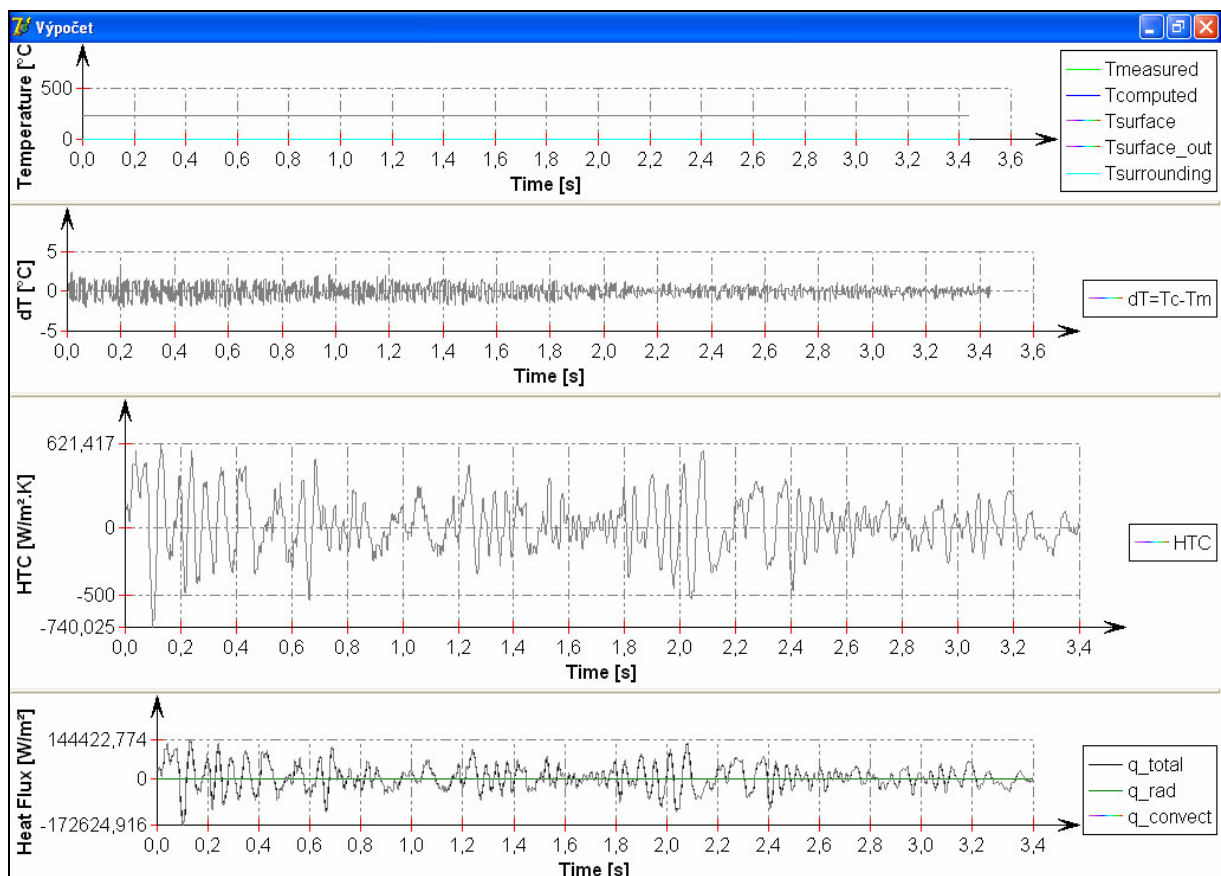
Obr.4.2. Panely programu „Inverzní výpočet“ pro základní nastavení výpočtu a geometrie čidla



Obr.4.3. Program „Inverzní výpočet“ s grafem průběhu vstupní teploty (vlevo) a parametry omezujícími výpočet HTC (vpravo)

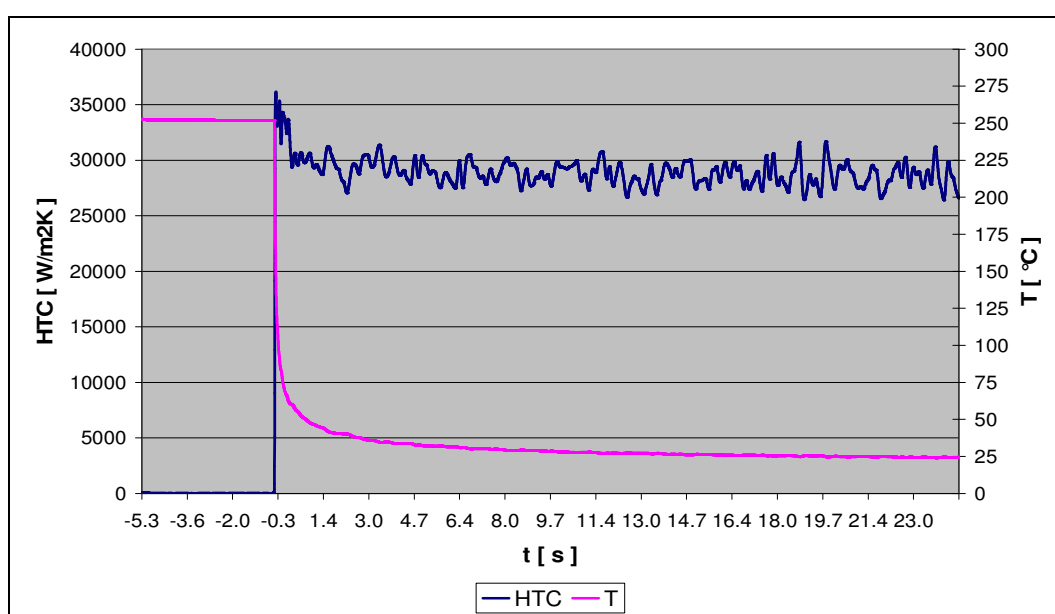


Obr.4.4. Panely programu „Inverzní výpočet“ s grafem optimalizace HTC a ukládanými daty



Obr.4.5. Postup výpočtu inverzní úlohy; grafy od shora: vstupní měřená teplota včetně šumu, dT rozdíl teplot měřená a spočtená inverzní úlohou, HTC ve $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$, Heat Flux je tepelný tok ve $W \cdot m^{-2}$, nenulové dT a záporné hodnoty HTC a HF jsou způsobeny šumem měřené teploty

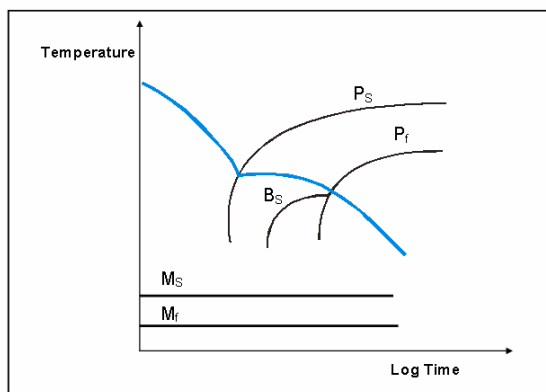
Výsledkem inverzního výpočtu je časový průběh součinitele HTC (Heat Transfer Coefficient). Na obr.4.6. je znázorněn typický průběh HTC (pozn.: modrá křivka). Jedná se o měření se vzorkem A s vodou jako chladícím médiem (pozn.: tlak 5 barů) a daty z „nejrychlejšího senzoru“ (pozn.: čidlo č.3 – válec, 0,5 mm pod povrchem). Růžová křivka znázorňuje teplotní průběh měřené teploty během chlazení. Vzorek byl zahříván na teplotu 250 °C a v čase 0s bylo spuštěno chlazení vodou. Začátek chlazení je patrný díky prudkému zlomu obou křivek. Teplota, v tomto případě zaznamenávána termočlánkem 0,5 mm pod povrchem, prudce klesá až na teplotu blízkou se teplotě chladiva. Ve stejný okamžik HTC prudce stoupá na své maximum a následně osciluje kolem průměrné hodnoty 28 000 W.m⁻².K⁻¹. Jedná se o velice intenzivní chlazení, kdy teplota senzoru klesne během prvních dvou sekund o více než 200 °C. Toto je typický průběh všech následujících experimentů.



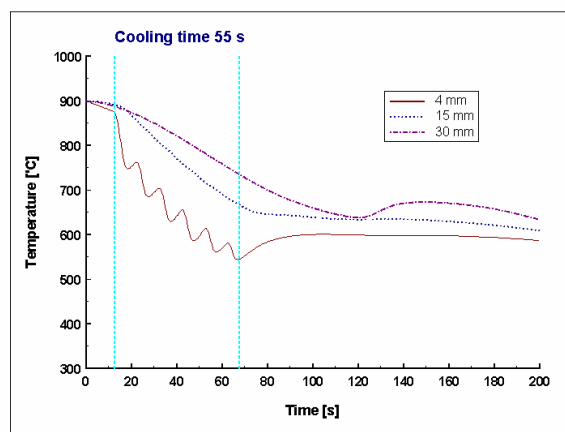
Obr.4.6. Průběh HTC a teploty – chlazení vodou 5 barů, časová osa t v sekundách

4.2. Měření se vzorkem B

Vzorek B byl vyroben z austenitické oceli V140Ti. Tento typ oceli byl dodána výrobcem Vítkovické slévárny, které byly zadavatelem tohoto projektu. Cílem projektu bylo získání ochlazovacích křivek pro materiál V 140 Ti v několika režimech tepelného zpracování. Přesná znalost ochlazovacích křivek měla přispět ke zlepšení mechanických vlastností oceli. Vhodným tepelným zpracováním lze dosáhnout mnohem lepší struktury materiálu [15 a 16]. Na obr.4.7. je znázorněn IRA digram oceli a ochlazovací křivka končící v perlitické struktuře. Obr.4.8. ukazuje možnosti řízeného chlazení, tak aby byla dosažena požadovaná struktura s danými vlastnostmi. Střídáním chlazení a přerušování lze řídit rychlost poklesu teplot.



Obr.4.7. IRA digram oceli

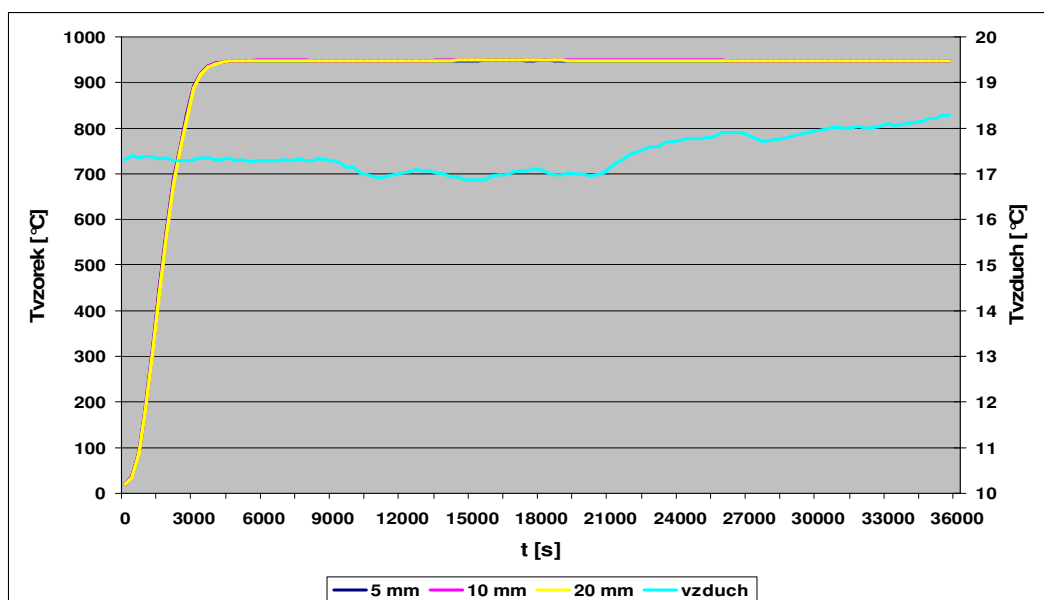


Obr.4.8. Chladicí křivky

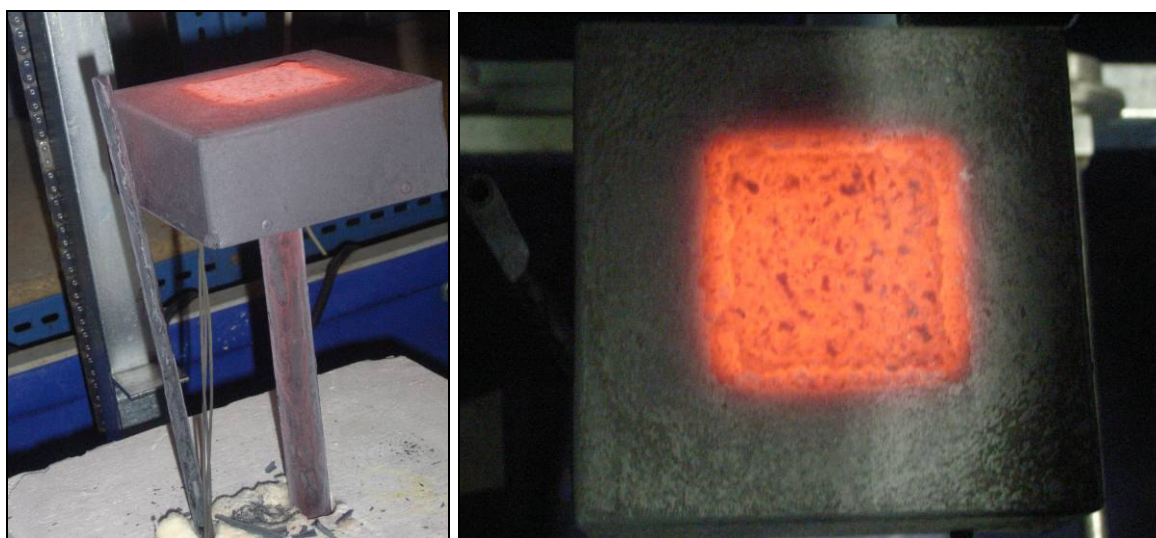
Přesné parametry ohřevu, výdrže a chlazení pro tento konkrétní typ oceli byly zadány zadavatelem projektu. Startovací teplota byla stanovena na 940 až 950 °C s výdrží 20 až 24 hod. Následuje chlazení v těchto režimech:

- Volný vzduch
- Proudící vzduch
- Proudící vzduch do 600 °C, pak voda+vzduch

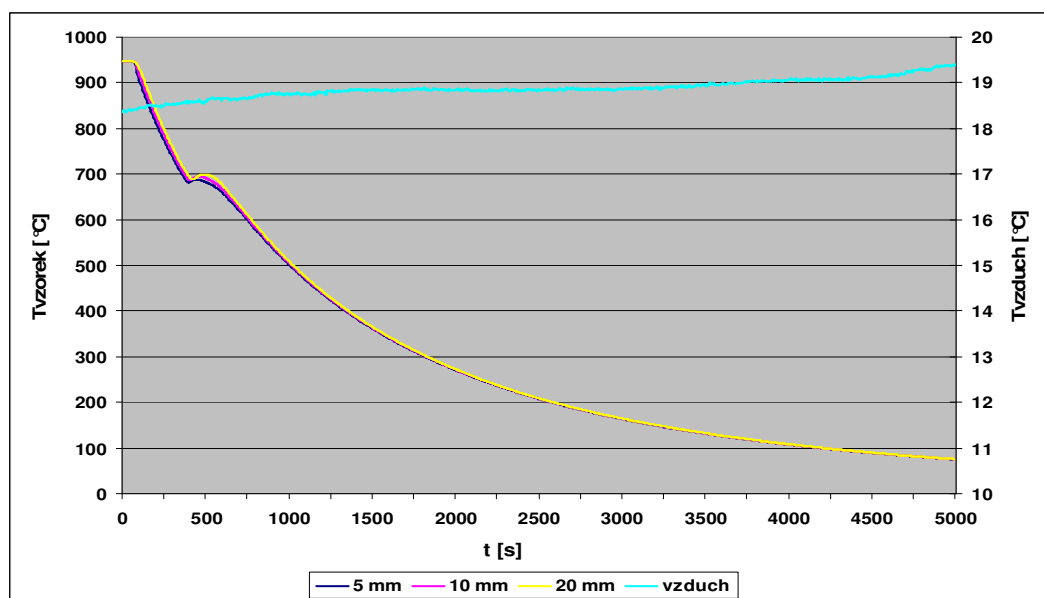
Měření se vzorky typu B bylo provedeno pouze v omezeném měřítku. Zadavatel projektu po provedení měření prvních několika vzorků odstoupil od studie. Z kompletního experimentálního plánu bylo proto provedeno pouze měření s chlazením na volném vzduchu. Inverzní algoritmus pro tuto úlohu a vzorek B proto nebyl vyvinut. V následujícím textu jsou uvedeny pouze grafy zobrazující pouze měřené průběhy teplot vztahující se k ohřevu vorku, výdrži na teplotě a chlazení vzduchem. Graf na obr.4.9 ukazuje průběh ohřevu vzorku (pozn.: časový interval 0 až 4 200 s). V dalším časovém intervalu pak zobrazuje část 24-hodinové výdrže na teplotě 948 °C. Poté byl vzorek (viz. obr.4.10) přesunut z muflové pece do chladicí sekce, kde proběhlo ochlazování na volném vzduchu. Průběh teplot během chladnutí je zaznamenán na obr.4.11. Graf je zajímavý zejména při chladnutí v intervalu okolo času 400 s a teploty 690 °C (viz obr.4.12). V tomto intervalu dochází k samovolnému nárůstu teploty vzorku (pozn.: žádný vnější tepelný zdroj) způsobené fázovou změnou uvnitř materiálu. Měření bylo 2x opakováno a vždy byl zaznamenán stejný průběh teplot.



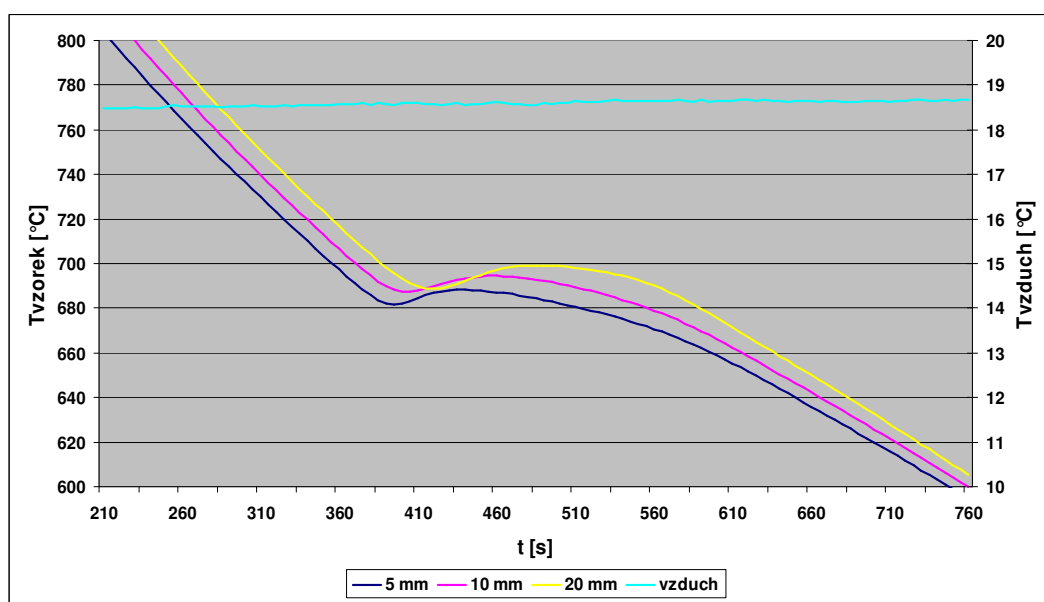
Obr.4.9. Průběh teploty ve vzorku B a okolního vzduchu – ohřev na 948 °C a časová výdrž na teplotě; časová osa t v sekundách; teplota čidel v 5, 10 a 20 mm pod povrchem na hlavní ose; teplota vzduchu v °C na vedlejší ose



Obr. 4.10. Detailní pohled na žhavý vzorek během vyjímání z pece, teplota vzorku 948 °C, vlevo: s viditelnou trubicí pro přívod inertního plynu (Ar)



Obr.4.11. Průběh teploty vzorku B a okolního vzduchu – chlazení na volném vzduchu; časová osa t v sekundách; teplota čidel v 5, 10 a 20 mm pod povrchem na hlavní ose; teplota vzduchu v $^{\circ}\text{C}$ na vedlejší ose



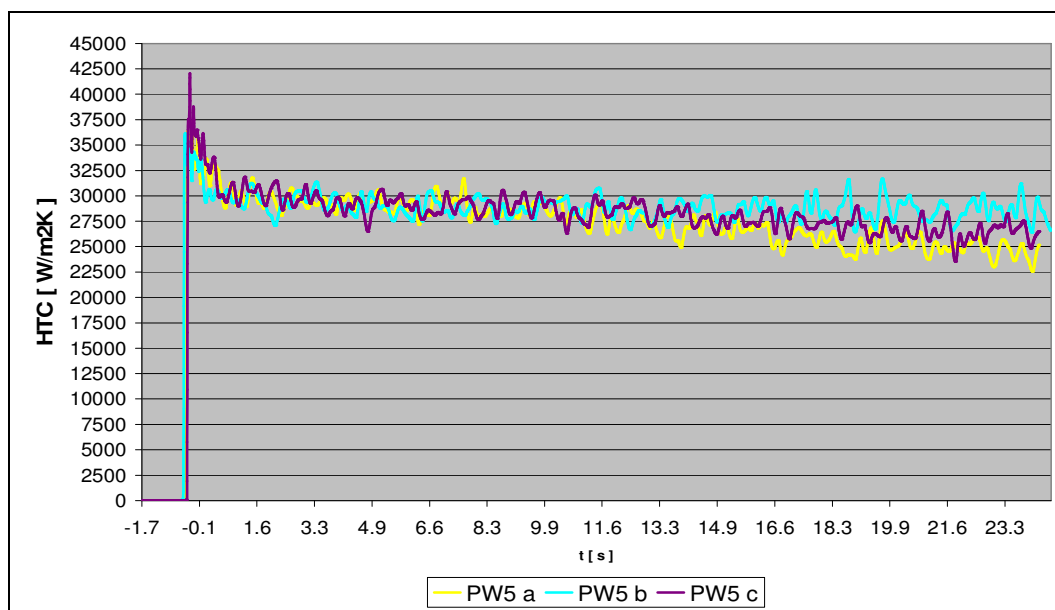
Obr.4.12. Průběh teploty vzorku B a okolního vzduchu v oblasti fázové změny – chlazení na volném vzduchu v intervalu okolo [400 s, 690 $^{\circ}\text{C}$]; časová osa t v sekundách; teplota čidel v 5, 10 a 20 mm pod povrchem na hlavní ose; teplota vzduchu v $^{\circ}\text{C}$ na vedlejší ose

4.3. Měření se vzorkem A

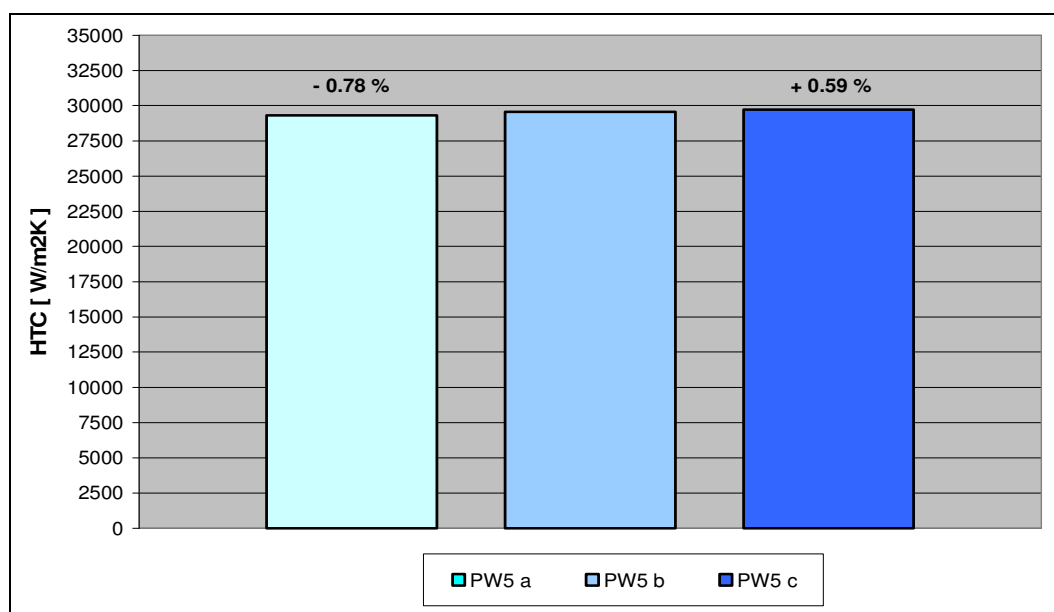
V této a následujících kapitolách jsou analyzovány experimenty měřené se vzorkem A. Jak už bylo zmíněno dříve vzorek A byl vybaven čtyřmi typy senzorů. Pro zjednodušení byl v této a kapitole a taktéž v kapitole 4.4. využívána data pouze z nejrychleji reagujícího senzoru č.3.

Důležitým prvkem každého experimentu je jeho opakovatelnost. V našem případě se jedná o to, zdali při stejném nastavení ostřikových parametrů získáme stejné průběhy teplot resp. spočítáme stejné průběhy HTC. Problémy mohou způsobovat např. šum v datech, nerovnoměrný

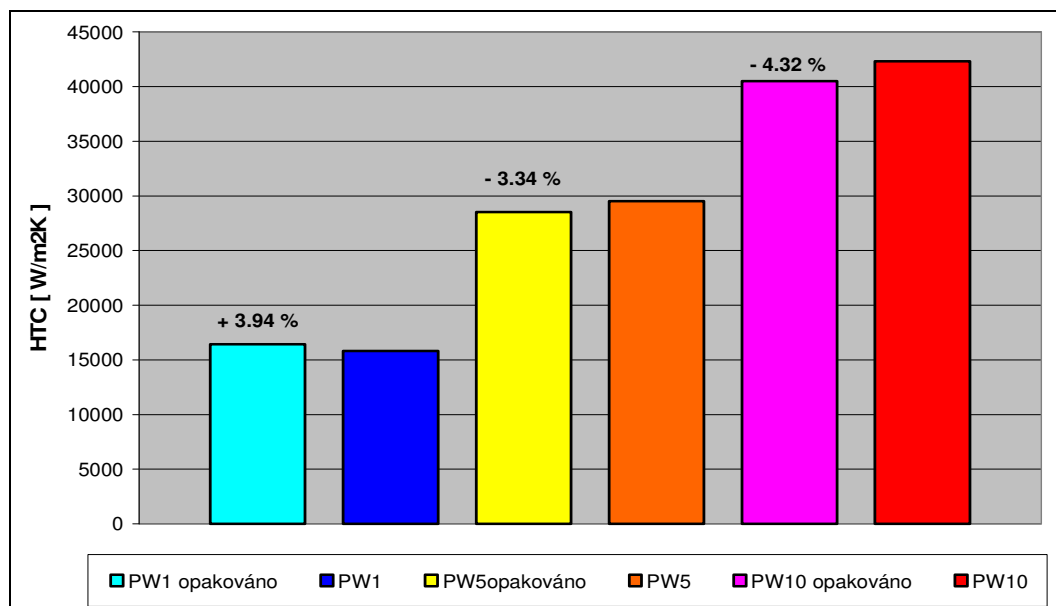
rozstřík chladiva či jeho náhodný odraz od experimentálního zařízení, atd. Z tohoto důvodu byly veškeré experimenty opakovány, některé i s mnohaměsíčním odstupem pro ověření experimentálního postupu a výpočtového algoritmu. Zejména byla důležitá přesnost experimentu s vodou o tlaku 5 barů (viz. obr.4.13), jakožto referenční hodnoty HTC pro porovnání s ostatními experimenty. Tyto tři experimenty byly provedeny s odstupem několika hodin během jednoho dne a zaznamenané rozdíly průměrných hodnot HTC (viz. obr. 4.14) se pohybují v intervalu do $\pm 1 \%$. Dlouhodobá opakovatelnost metody je potvrzena v grafech obr.4.15. pro vodu s tlakem od 1 do 10 barů. V tomto případě se rozdíly v měření s odstupem 6 měsíců pohybují v intervalu do $\pm 5 \%$.



Obr.4.13. Průběh HTC pro vodu 5 barů (referenční měření) – 3x opakováno během 24 hodin

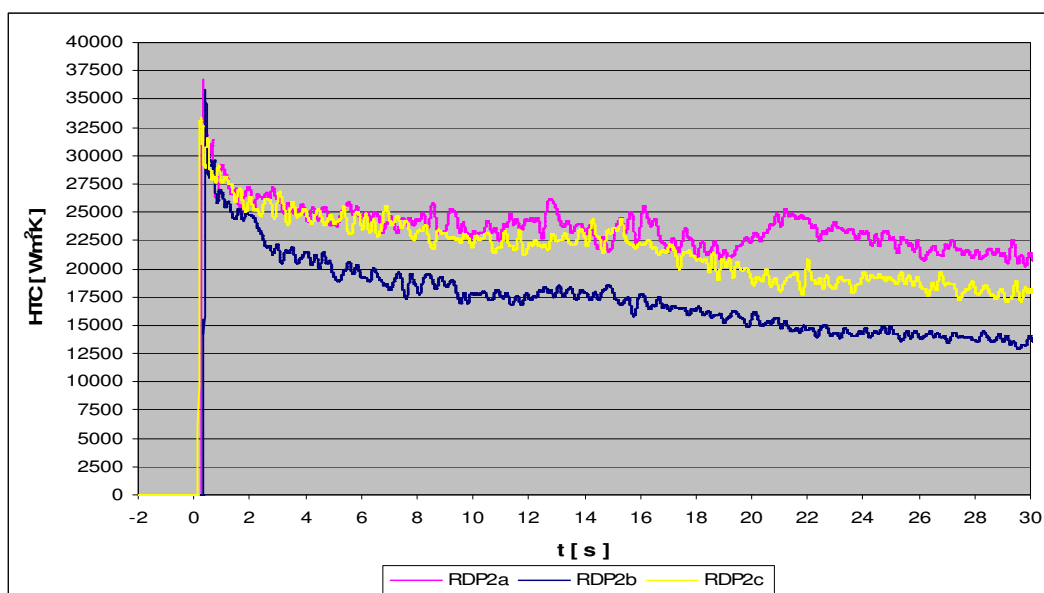


Obr.4.14. Průměrné HTC pro vodu 5 barů (referenční měření) – 3x opakováno během 24 hodin

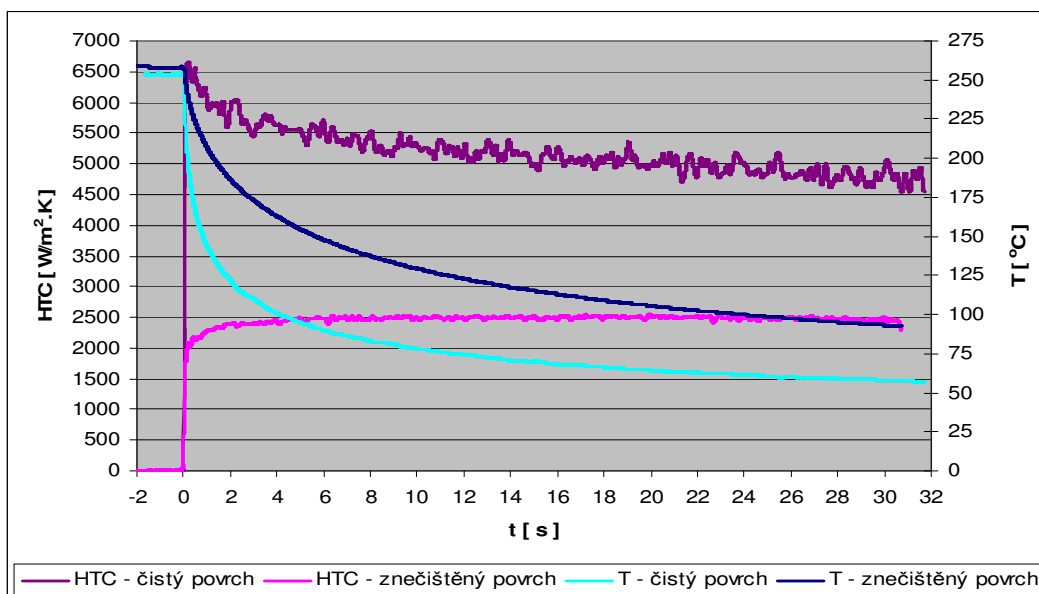


Obr.4.15. Průměrné HTC pro vodu 1, 5 a 10 barů – 2x opakováno s dlouhým časovým rozestupem (6 měsíců)

Problematická byla opakovatelnost pro „olejová“ chladiva – směsi voda a olej. Např. na obr.4.16. je znázorněn průběh HTC pro směs vody a oleje Rolkleen DP 2062. Zde je patrný větší rozptyl měřených výsledků (pozn.: provedeno během 24 hodin). V nejhorším případě je rozdíl mezi max. a min. hodnotou až 20 %. Příčinou takových výsledků je obtížné dodržení koncentrace chladiva v důsledku špatné rozpustnosti oleje ve vodě. Olej se během experimentu i přes neustálé míchání odděloval od vody (pozn.: dle hustoty na povrchu či dně), tvořil pěnu a čerpadlo ne vždy dodávalo do chladicího okruhu optimální směs. Dalším problémem pro olejová chladiva bylo připékání olejových usazenin na povrchu vzorku v průběhu chlazení. Takovéto vrstvy připálenin tvořily dodatečný tepelný odpor bránící přestupu tepla. Obr.4.17. porovnává tentýž experiment pro chladivo Somentor 34 za stejných podmínek pro čistý a znečištěný povrch. Rozdíly jsou zřetelně patrné – výrazně pomalejší pokles teploty a přibližně poloviční hodnoty HTC. Z těchto důvodů musely být experimenty pečlivě kontrolovány, ověřovány a opakovány pro zajištění správných výsledků.

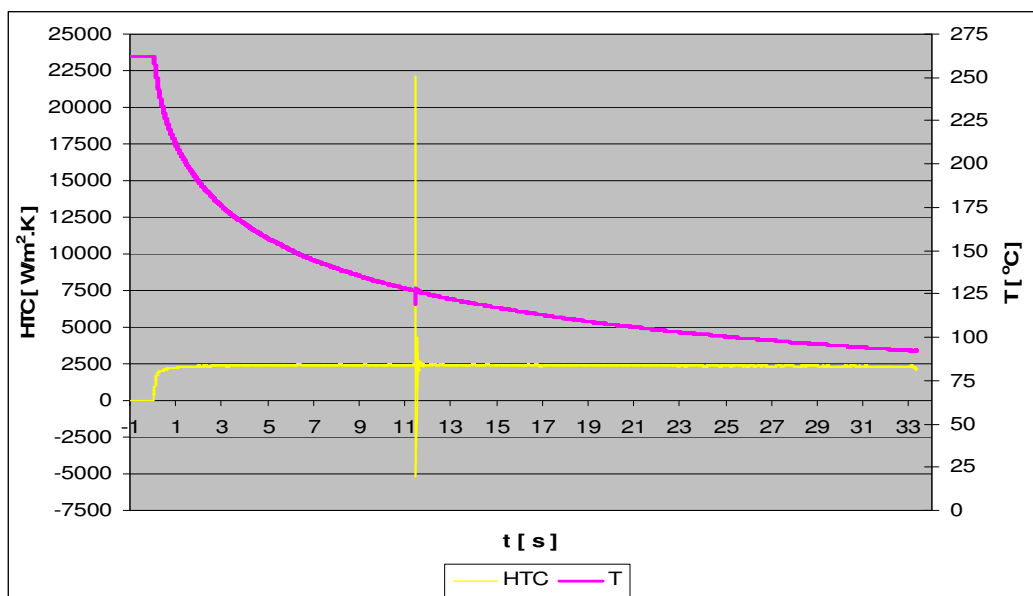


Obr.4.16. Průběh HTC pro Rolkleen DP 2062 při tlaku 5 barů – 3x opakováno během 24 hodin; rozdíly v HTC byly způsobeny špatnou rozpustností oleje ve vodě

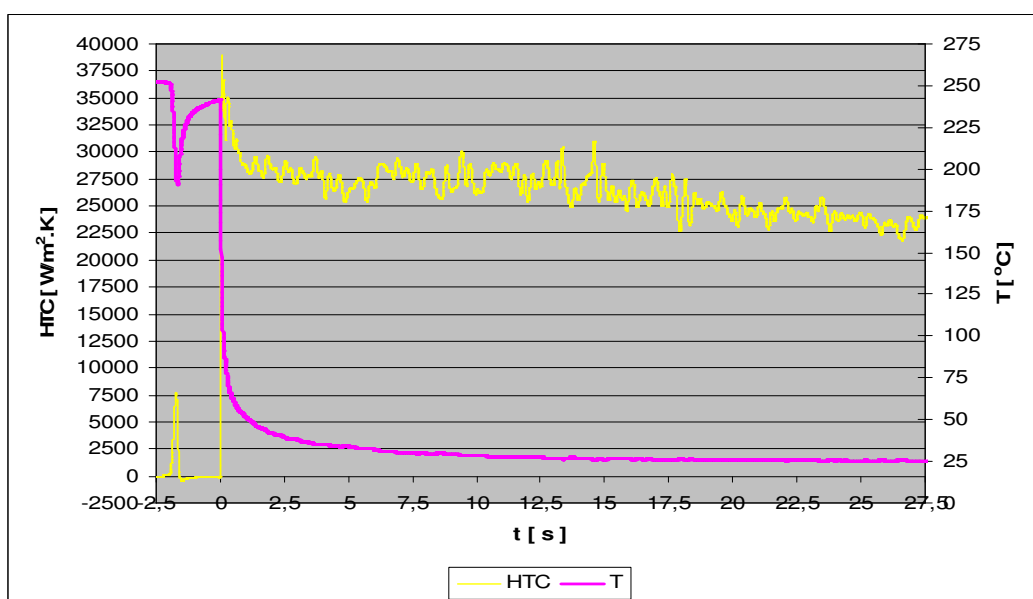


Obr.4.17. Průběh HTC pro Somentor 34 a tlak 5 barů – čistý a znečištěný povrch; rozdíly v HTC byly způsobeny připékáním oleje na povrch vzorku (tepelný odpor)

Jako všechna experimentálně získaná data jsou i tyto záznamy ovlivněny chybami a šumem. Kromě obvyklého šumu a oscilací docházelo v měřených datech i k jednorázovým skokům v měřené teplotě, viz. obr.4.18. a 4.19. Tyto okamžité a prudké změny vyvolaly výrazný nárůst HTC – o několik řádů větší než by odpovídalo fyzikální podstatě jevu. Např. na obr.4.18. teplotní změna o 8 °C během 0,1s vyvolal nárůst HTC z průměrné hodnoty 2 400 na 22 159 W.m⁻².K⁻¹. Následné vyrovnávání teplot způsobilo pokles HTC na hodnotu -5 000 W.m⁻².K⁻¹. Na obr.4.19. zase náhodný odraz chladiva před otevřením deflektoru způsobil pokles teploty o celých 57 °C a HTC stoupl z 0 na více než 7 500 W.m⁻².K⁻¹. Tato data byla upravena (interpolace bodových poruch) nebo byla přeměřena znovu.



Obr.4.18. Průběh teploty a HTC pro Somentor 34, 3 bary – chyba v datech v čase 11,5s



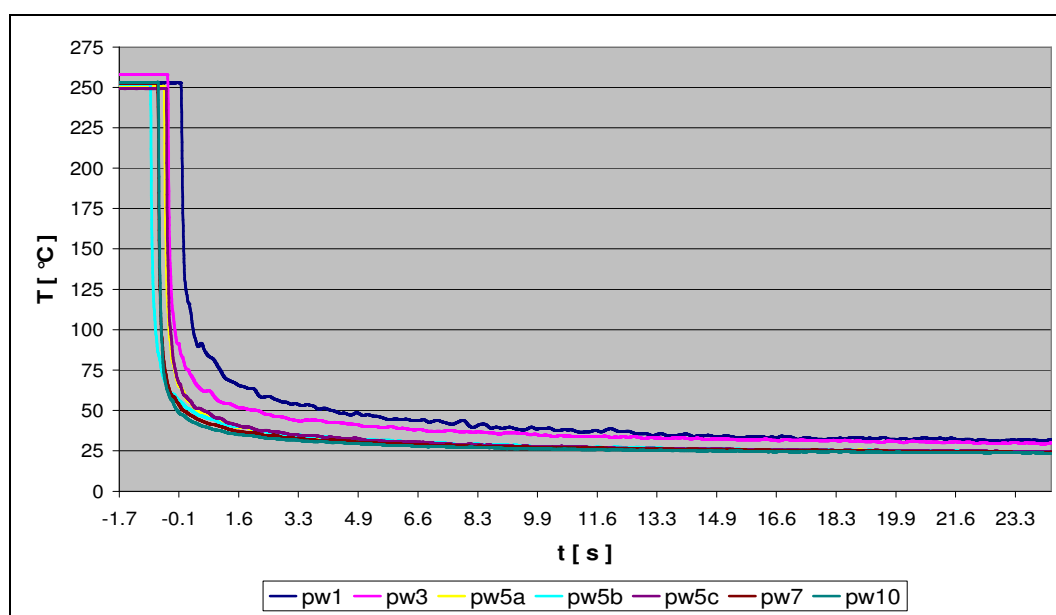
Obr.4.19. Průběh teploty a HTC pro čistou vodu 5 barů – chyba v datech v čase -2s až -1s

4.4. Porovnání chladiv

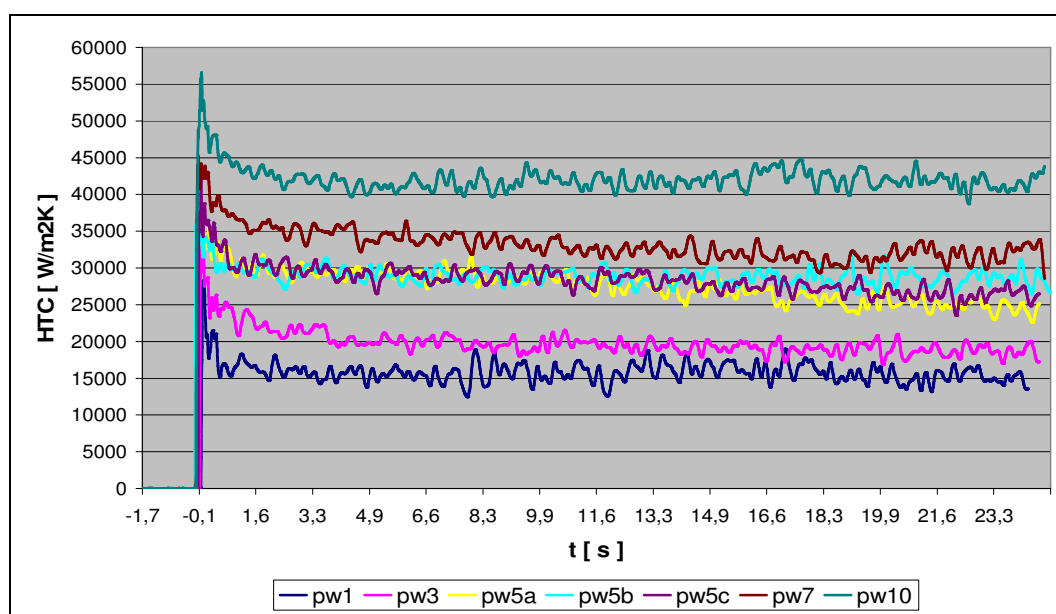
V následujícím textu se budeme zabývat výsledky měření s různými typy chladiv. Jak již bylo uvedeno v části 3.4. byly testovány různé typy chladiv (např. voda, oleje, emulze) s různými parametry ostříku (tlak resp. průtok, koncentrace). Cílem bylo porovnat a následně kvantifikovat vliv rozdílných chladiv na velikost HTC. Všechny experimenty byly uskutečněny na vzorku A s počáteční teplotou 250 °C a při tlaku 5 barů. Experimenty s vodou a chladivem Rollkleen byly prováděny navíc s tlakem 1 – 10 bar (9 – 24 l/min.) resp. 1 – 5 bar (12 – 21 l/min.). Chladivo Lubrodal RM192 bylo zkoušeno v různých koncentracích od 0,1 % - 50 % (roztok RM192 +

destilovaná voda). Taktéž byly provedeny zkoušky s různou tvrdostí vody (pozn.: podrobněji viz. tab.3.5., 3.6. a 3.7.).

Destilovaná voda: celkem zde bylo proměřeno 5 různých nastavení tlaku – 1, 3, 5, 7 a 10 barů (viz. tab.3.1. a 3.2). Chlazení vodou při tlaku 5 barů je bráno jako referenční experiment pro porovnání s ostatními chladivý. Na obr.4.20. jsou znázorněny grafy průběhů teplot v čase pro tyto experimenty. Je zde patrná závislost mezi velikostí tlaku (a tudíž i průtoku) chladicí kapaliny a rychlosti poklesu teploty. Průběh poklesu teplot při tlaku 1 bar (tmavě modrá křivka) je výrazně pomalejší než při 10 barech (zelená křivka).

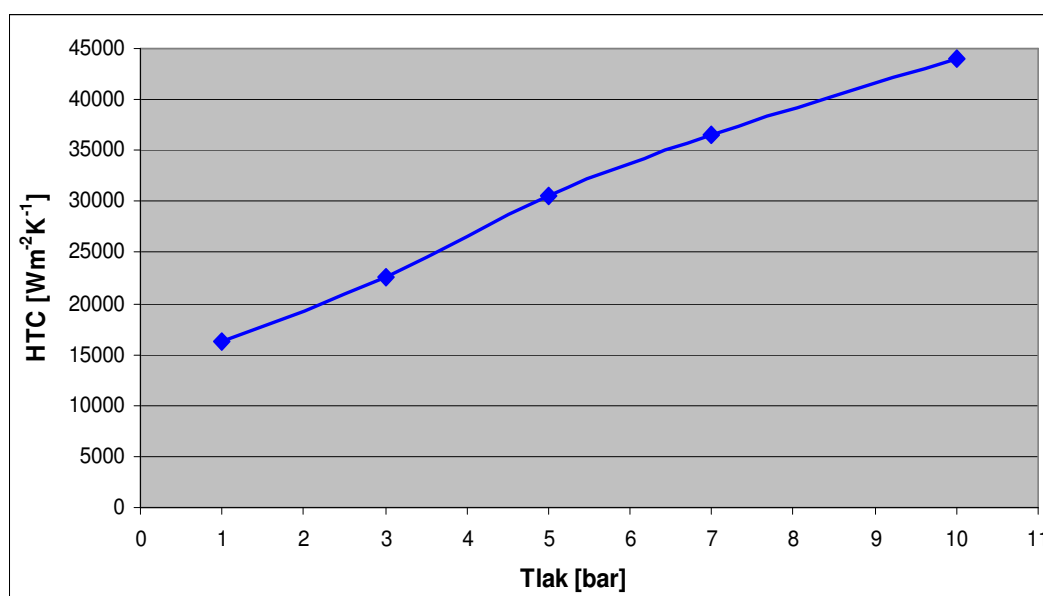


Obr.4.20. Průběh naměřených teplot v čase pro vodu, rozsah tlaků 1 bar (ozn.: pw1) až 10 (pw10) barů



Obr.4.21. Průběh HTC v čase pro vodu, rozsah tlaků 1 bar (ozn.: pw1) až 10 (pw10) barů; zvyšování tlaku chladiva zvyšuje HTC

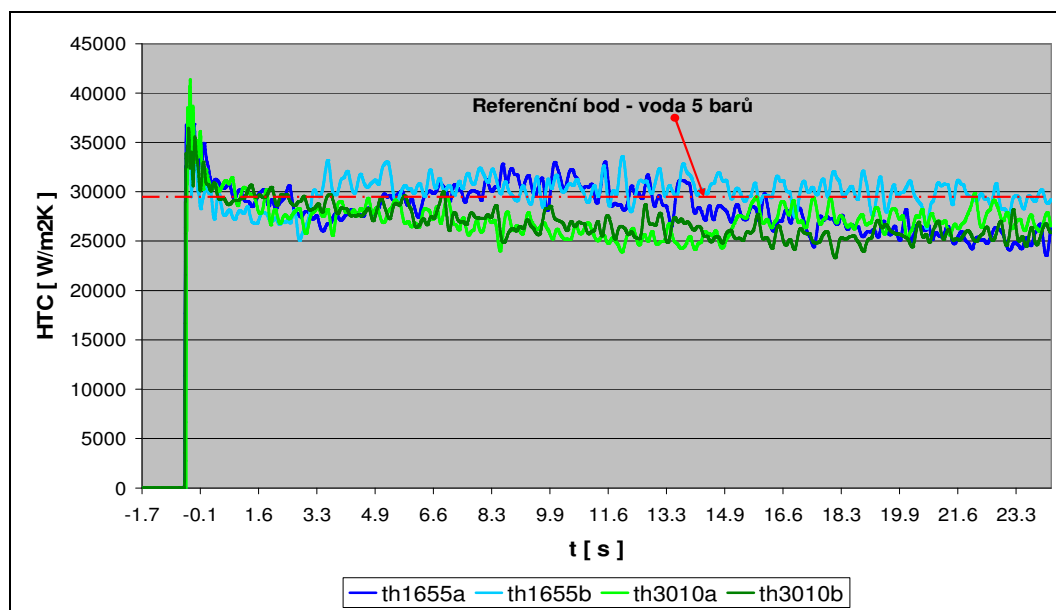
Pomocí inverzní úlohy byl z těchto dat vypočten HTC, viz. obr.4.21. Opět je zde dobře patrný vliv tlaku chladiva – HTC pro 1 bar osciluje okolo $15\,000\text{ W.m}^{-2}\text{K}^{-1}$, zatímco referenční HTC pro 5 barů se pohybuje okolo $30\,000\text{ W.m}^{-2}\text{K}^{-1}$ a hodnoty HTC pro 10 barů dosahují hodnot přes $40\,000\text{ W.m}^{-2}\text{K}^{-1}$. Z těchto grafů byly pro snazší porovnatelnost vypočítány průměrné hodnoty HTC pro daný tlak. Výpočet byl vždy prováděn pouze z ustálené části HTC a průměrné hodnoty HTC jsou platné pro rozsah povrchových teplot 20 až 250 °C. Graf na obr.4.22 ukazuje nárůst intenzity chlazení v závislosti na tlaku chladiva. Pro praktické využití těchto výsledků lze říci, že regulací tlaku v chladicím okruhu v rozmezí 1 až 10 barů jsme schopni řídit chlazení v rozsahu $\pm 45\%$ vůči referenčnímu tlaku 5 barů. Takováto znalost může výrazně přispět k lepšímu řízení technologických procesů a vyšší kvalitě v celé řadě hutnických aplikací (např. kontinuální lití, válcování za tepla).



Obr.4.22. Průměrné hodnoty HTC pro rozsah tlaku chladiva 0 – 10 barů

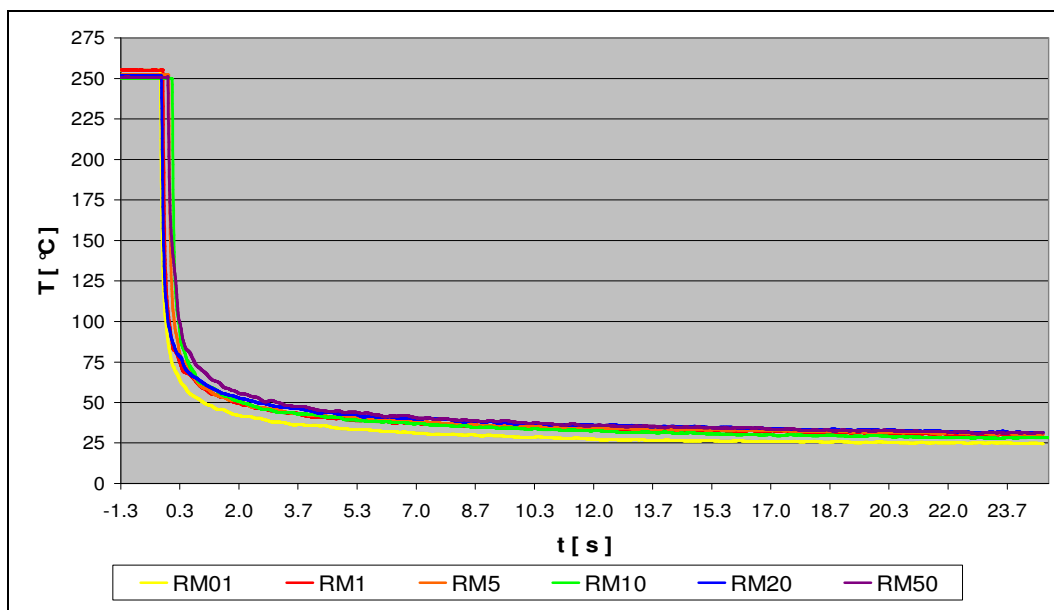
Tvrdost vody (seznam experimentů viz. tab.3.1.): Měření s vodou s různou tvrdostí (v závislosti na příměsích) nepřinesla žádné výrazné změny v naměřených hodnotách HTC (obr.4.23). V porovnání s „čistou vodou“ vykazují vzorky pouze mírný pokles chlazení – pokles průměrného HTC v rozmezí 1 až 3 %). Při následné analýze odebraných vzorků bylo zjištěno (pozn.: opět provedeno v laboratořích BFI, Düsseldorf, Německo pod vedení Dr. Tila Reichardta), že skutečná tvrdost byla výrazně vyšší než předpokládal experimentální plán. Přestože byly chladicí roztoky připravovány s vysokou pečlivostí (pozn.: přesnost použitých vah byla $< 1\text{ g}$), tak skutečné hodnoty dosahovaly hodnot 23 mmol (pro experimenty s plánovanou tvrdostí 16,55 mmol) a 43 mmol (pro experimenty s plánovanou tvrdostí 30,10 mmol). Hodnoty tvrdosti „čisté vody“ se pohybovaly okolo 4 mmol. Důvodem těchto nepřesností byla předem neznámá tvrdost „čisté“ vody, nedokonalé promísení a skutečnost, že se tvrdost chladiva laboratorně zjišťovala až několik měsíců po provedení experimentů. Lze tedy předpokládat, že vliv tohoto parametru na

praktické chlazení lze zanedbat a další zvyšování tvrdosti vody by patrně snížilo průměrné HTC ne více jak o 5 %.

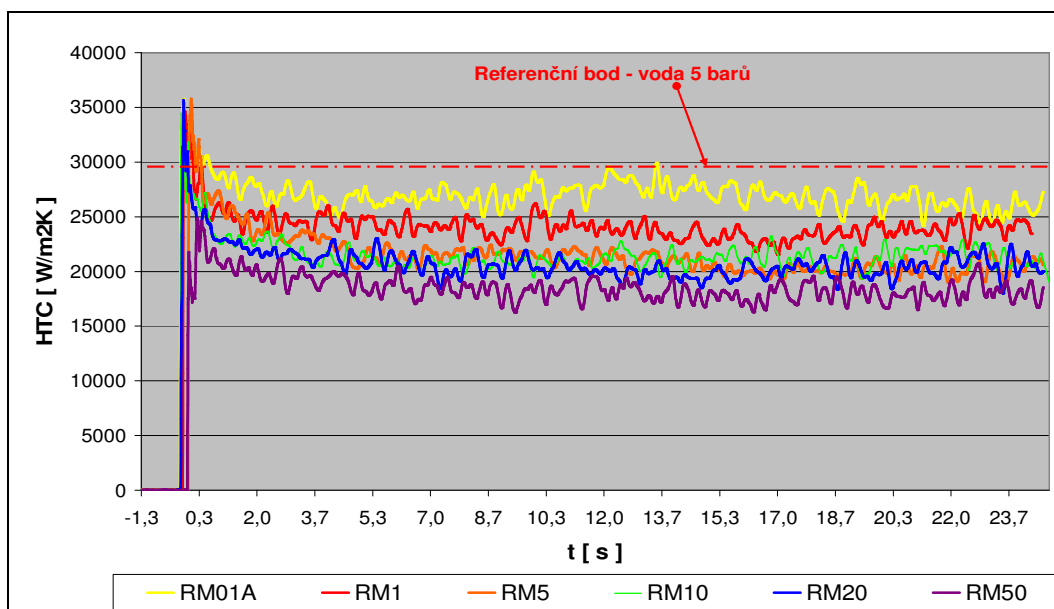


Obr.4.23. Průběh HTC v čase pro roztoky solí; předpokládaná tvrdost vody 16,55 mmol (modré křivky) a 30,10 mmol (zelené křivky)

Směs vody a RM192: tato kombinace chladiv byla měřena v široké škále možných koncentrací a to: 0,1 %, 1 %, 5 %, 10 %, 20 % a 50 % (viz. tab.3.1. a 3.2.). Průběhy teplot a HTC jsou zobrazeny v grafech na obr.4.24. a 4.25. Vyhodnoceny byly opět vůči referenční hodnotě vody 5 barů. Z experimentů vyplývá nižší účinnost chlazení směsi vody a minerálního oleje oproti „čisté“ vodě. Byla zjištěna nepřímá závislost mezi procentuálním obsahem oleje ve vodě a velikostí HTC. Při použití koncentrace 0,1 % se HTC pohybuje okolo hodnoty $28\,000\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$, zatímco při 1 % už pod $25\,000\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ a při koncentraci 50 % HTC pokleslo pod hodnotu $20\,000\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$. Z těchto hodnot vyplývá, že největší pokles HTC byl způsoben přidáním malého množství lubrikantu. Přidání 0,1 % způsobilo relativní pokles HTC o 7,8 %, měření s koncentrací 1 % pak ukázalo pokles 17,7 % a u koncentrace 50 % byl zjištěn pokles o 35,6 %. K ověření tohoto zjištění byla provedena druhá kontrolní série měření, která ukázala stejné závěry. Tuto nově zjištěnou závislost nelze vysvětlovat změnou tepelné kapacity chladiva, protože přidáním 0,1% oleje do vody se hodnota c_p změní minimálně. Jev lze vysvětlit změnou povrchového napětí chladicí kapaliny a změnou smáčivosti povrchu. V tomto případě i malé množství přidaného oleje změní smáčivost povrchu a velikost kapek. Tento závěr lze také interpretovat tak, že další a výraznější zvyšování koncentrace již nemá tak zásadní vliv na pokles HTC.



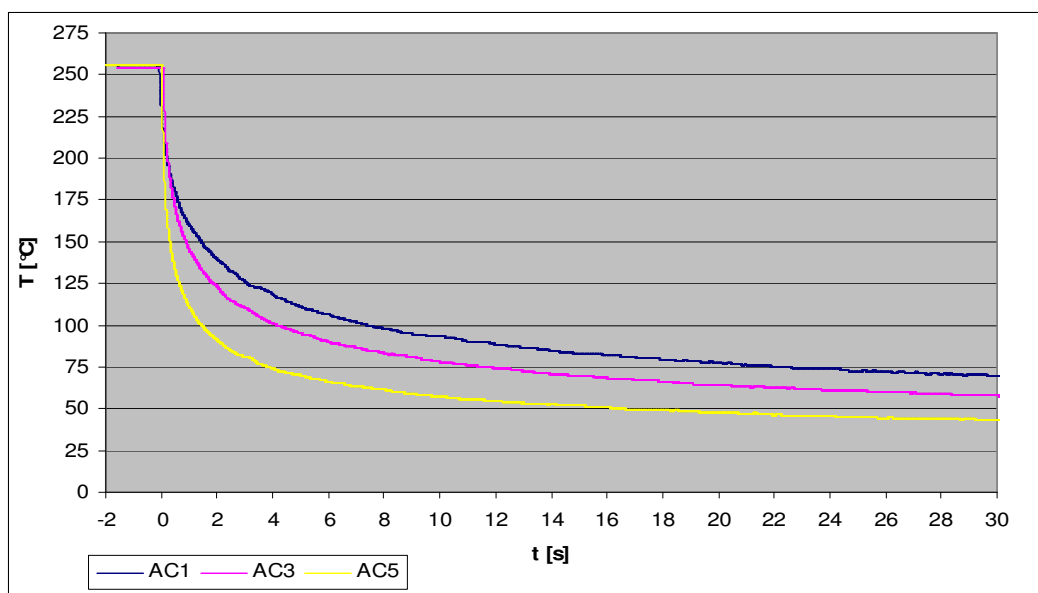
Obr.4.24. Průběh naměřených teplot v čase pro chladivo RM192, koncentrace 0,1% (ozn.: RM01) až 50% (RM50) ve vodě



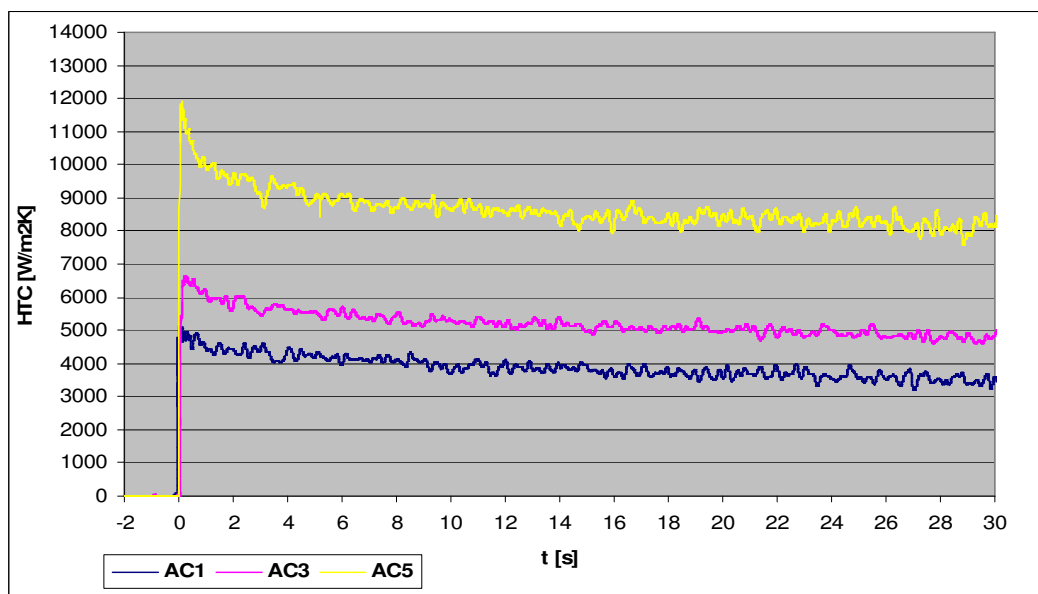
Obr.4.25. Průběh HTC v čase pro chladivo RM192, koncentrace 0,1% (ozn.: RM01) až 50% (RM50) ve vodě; zvyšování koncentrace oleje v emulzi snižuje HTC

Somentor 34: pro toto chladivo byly zjišťovány hodnoty HTC v závislosti na nastaveném tlaku v chladicím systému (viz. tab.3.2.). Experimentální plán počítal s proměřením hodnot 1, 3 a 5 barů. V následujících grafech 4.26. a 4.27. jsou znázorněny průběhy měřených teplot a vypočtené hodnoty HTC. Již z prvního obrázku je patrný pozvolnější pokles teploty a vyšší koncové teploty pro tento typ chladiva. Tomu následně odpovídají i výrazně nižší hodnoty HTC, oscilující okolo hodnot $4\,000\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ pro 1 bar, $5\,000\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ pro 3 bary a $8\,500\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ pro 5 barů. Na obr. 4.28. a 4.29. následuje názorné porovnání s výsledky měření pro čistou vodu. Graf na obr.4.28 porovnává HTC pro vodu a Somentor 34 v závislosti na tlaku chladiva. Velikost HTC je pro Somentor 34 v porovnání s čistou vodou výrazně nižší a to o 76,1 % pro tlak 1 bar, o

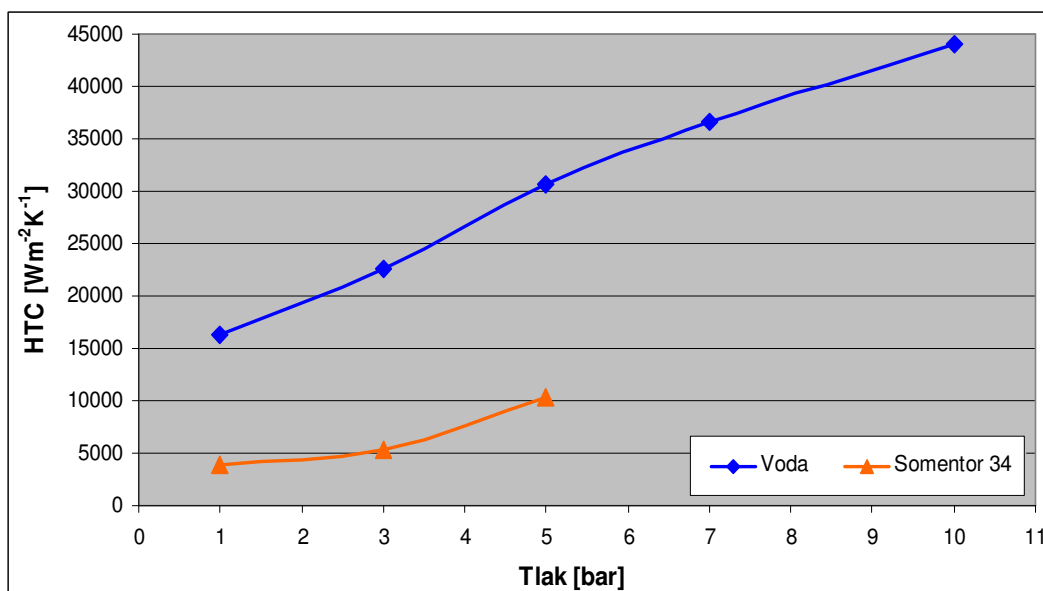
76,5 % pro 3 bary a o 66,3 % pro tlak 5 barů. V kapitole 3.5 byla stanovena závislost mezi tlakem a průtokem pro Somentor 34 a čistou vodu (viz. obr.3.50), pro lze tytéž hodnoty HTC porovnávat i vůči průtoku obou chladiv. Výše zmíněná závislost na obr.3.50 udává výrazně vyšší průtoky pro Somentor 34 v porovnání s vodou při stejné hodnotě tlaku. Tento fakt zvyšuje procentuální rozdíl v HTC mezi vodou a Somentorem 34 při stejných průtocích. HTC tak poklesne o 82,6 % při průtoku 18 l/min a o 71,9 % při 20,7 l/min.



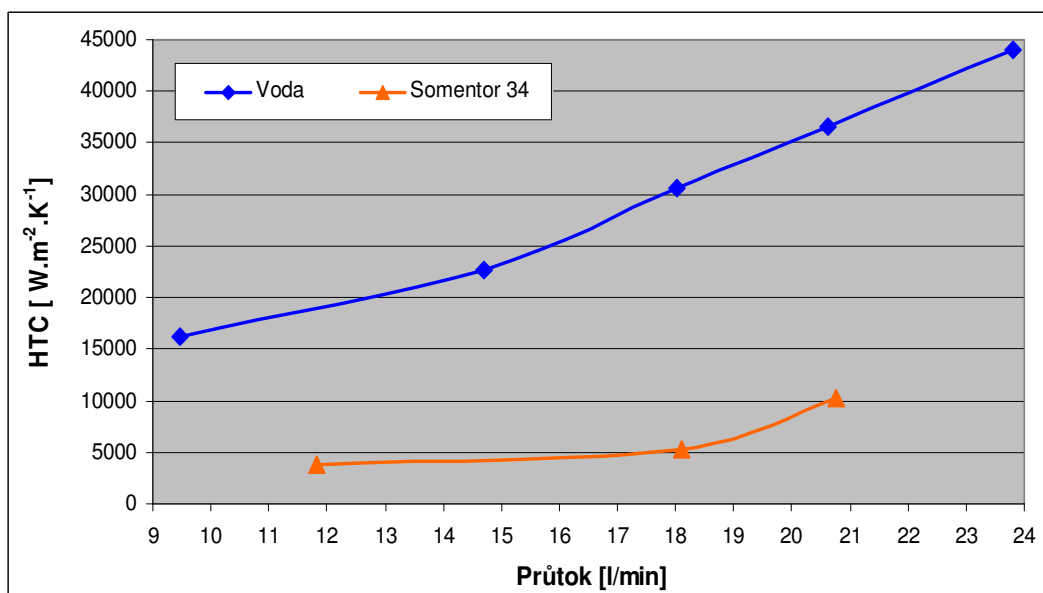
Obr.4.26. Průběh naměřených teplot v čase pro chladivo Somentor 34, nastavení tlaku 1 (ozn.: AC01), 3 (AC03) a 5 barů (AC5)



Obr.4.27. Průběh HTC v čase pro chladivo Somentor 34, nastavení tlaku 1 (ozn.: AC01), 3 (AC03) a 5 barů (AC5); zvyšování tlaku chladiva zvyšuje HTC

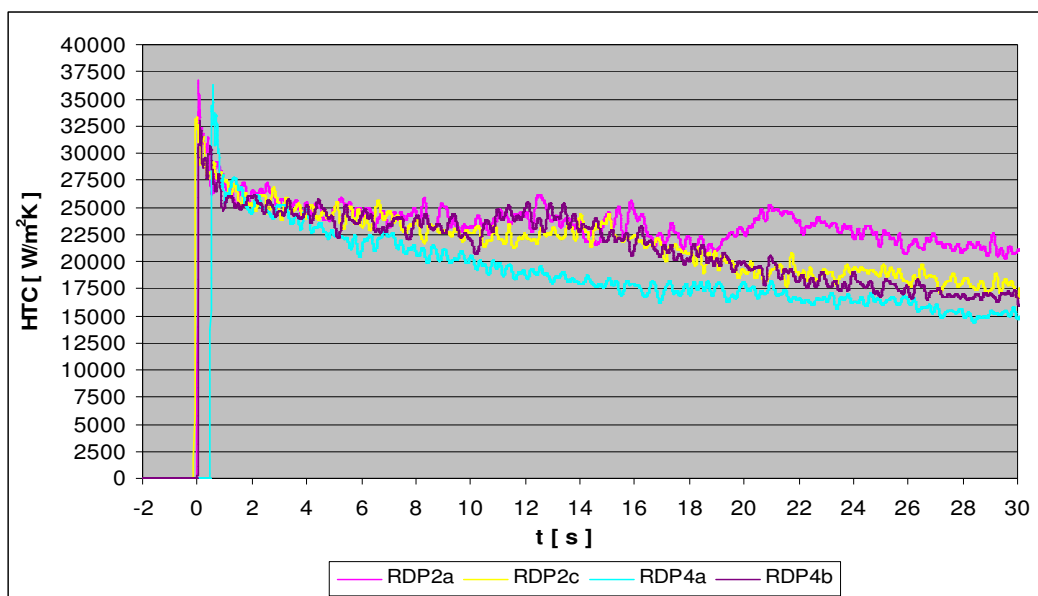


Obr.4.28. Průběh HTC v závislosti na nastaveném tlaku pro čistou vodu a chladivo Somentor 34

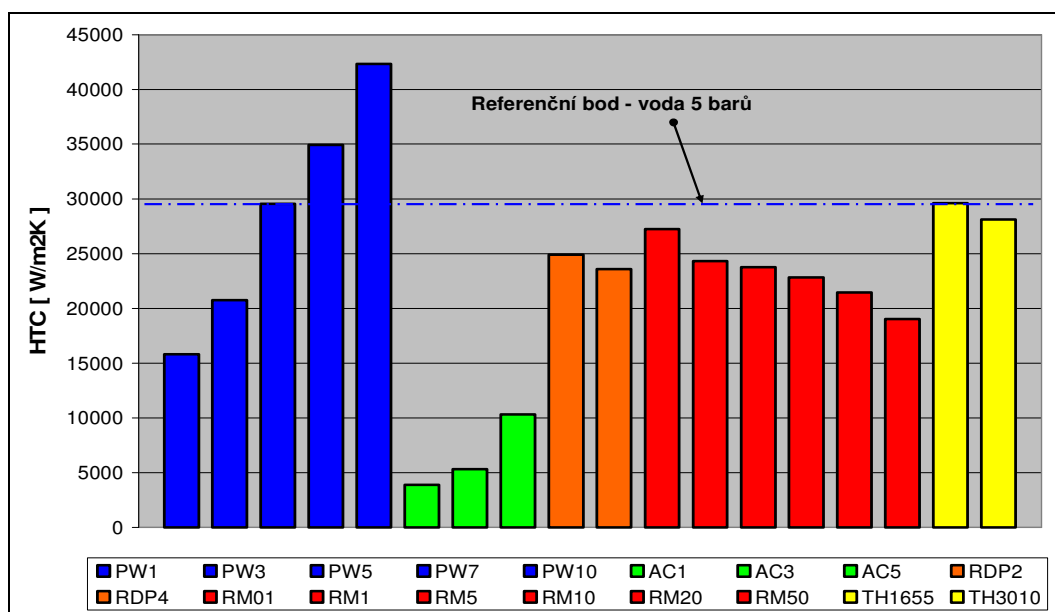


Obr.4.29. Průběh HTC v závislosti na měřeném průtoku pro čistou vodu a chladivo Somentor 34

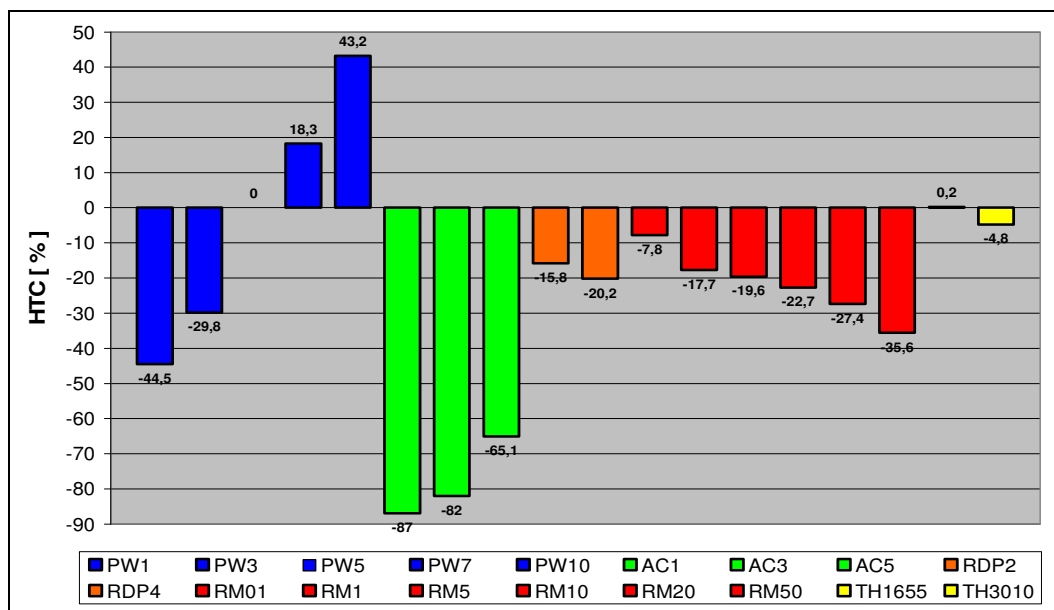
Směs vody a Rolkleen DP 2062: Tato olejová emulze je primárně určen pro mazání a chlazení válců při válcování za studena. Podobně jako u měření s RM192 byly i zde zkoumány různé koncentrace chladiv a jejich vliv na velikost HTC. V tomto případě byl měřeny koncentrace přímo z technické praxe, a to konkrétně hodnoty 2 % a 4 % (pozn.: hodnoty doporučené výrobcem maziva). Všechny experimenty s tímto chladivem byly provedeny při použití tlaku 5 barů (detailněji viz. tab.3.2.). Průběhy HTC jsou opět zobrazeny v grafech a to na obr.4.30. Při porovnání vůči referenčnímu měření z experimentů s vodou vyplývá opět nižší účinnost chlazení směsi vody a oleje. Podobně jako u RM192 se objevila nepřímá závislost mezi procentem oleje ve vodě a velikostí HTC. Při použití koncentrace 2 % se hodnoty HTC pohybují okolo hodnoty 25 000 W.m⁻².K⁻¹, zatímco při použití 4 % klesne HTC pod 23 500 W.m⁻².K⁻¹, což odpovídá 84 % resp. 80 % hodnot HTC pro čistou vodu a tlak 5 barů.



Obr.4.30. Průběh HTC v čase pro chladivo Rolkleen DP 2062, koncentrace 2 % (ozn.: RDP2) a 4 % (RDP4); zvyšování koncentrace oleje v emulzi snižuje HTC



Obr.4.31. Průměrné absolutní hodnoty HTC pro všechna chladiva a parametry, modré sloupce – voda (1 – 10 barů, ozn.: PW1 – PW10), zelené - Somentor 34 (1, 3 a 5 barů, ozn.: AC1 – AC5), oranžové - Rolkleen DP 2062 (koncentrace 2 % a 4 %, ozn.: RDP2 a RDP4), červené – Lubrodal RM192 (koncentrace 0,1 % - 50 %, ozn.: RM01 – RM50) a žluté – tvrdost vody (TH 16,55 a 30,10)



Obr.4.32. Relativní rozdíly průměrné hodnoty HTC v % vůči referenční hodnotě (voda 5 barů) pro všechna chladiva a parametry, modré sloupce – voda (1 – 10 barů, ozn.: PW1 – PW10), zelené - Somentor 34 (1, 3 a 5 barů, ozn.: AC1 – AC5), oranžové - Rolkleen DP 2062 (koncentrace 2 % a 4 %, ozn.: RDP2 a RDP4), červené – Lubrodal RM192 (koncentrace 0,1 % - 50 %, ozn.: RM01 – RM50) a žluté – tvrdost vody (TH 16,55 a 30,10)

Celkové porovnání pro zkoumaná chladiva je prezentováno na obr.4.31., kde jsou v grafech uvedeny průměrné absolutní hodnoty HTC, a na 4.32., kde grafy zobrazují procentuální odchylky od referenční hodnoty. Destilovaná voda vykazuje nejvyšší hodnoty HTC ze všech chladiv při tlaku 5 barů - 29 546 W.m⁻².K⁻¹. Experimenty s vodou jako hlavním chladicím médiem prokázaly velký vliv tlaku (resp. průtoku) na intenzitu přestupu tepla. Při použití nejnižšího tlaku 1 bar bylo HTC rovno 15 808 W.m⁻².K⁻¹, tj. 54% referenční hodnoty (pozn.: destilovaná voda 5 barů). Pro nejvyšší použitý tlak 10 barů HTC stoupl na hodnotu 42 234 W.m⁻².K⁻¹, tj. nárůst o 43% vůči referenční hodnotě. Na druhou stranu vliv tvrdosti vody na výši součinitele přestupu tepla je minimální vzhledem k přesnosti měření. Maximální pokles HTC byl pro nejvyšší tvrdost vody menší jak 5%. Průměrné HTC pro „tvrdou vodu“ se pohybovalo v rozmezí +0,2% až -4,8% referenční hodnoty destilované vody.

Výrazně vyšší vliv na velikost HTC mělo použití olejů jako chladiva. Měření ukázala, že použitím oleje a olejových emulzí dochází k výrazné redukci průměrného HTC. Při použití čistého oleje Somentor 34 při tlaku 5 barů došlo k poklesu o 65,1 % vůči referenční hodnotě. Podobně jako pro vodu i pro tento typ chladiva byl zjištěn velký vliv tlaku na velikost HTC. Při použití tlaku 1 bar dosahuje HTC 3 885 W.m⁻².K⁻¹, zatímco při nastavení 3 bary je průměrné HTC rovno 5 325 W.m⁻².K⁻¹. Nejvyšší hodnoty HTC dosáhl 100% olej při tlaku 5 barů a to 10 297 W.m⁻².K⁻¹. V porovnání s čistou vodou je olej za všech tlaků výrazně méně účinné chladivo.

Experimenty s emulzemi (pozn.: voda a Rolkleen DP 2062, voda a Lubrodal RM192) prokázaly vliv koncentrace oleje v chladicí směsi na velikost HTC. Rostoucí koncentrace měla za následek pokles hodnot HTC. Zajímavým zjištěním je fakt, že největší pokles nastal při chlazení nízkými koncentracemi. Příměsi 0,1 % a 1% RM192 způsobilo pokles průměrné hodnoty HTC o 7 % a 17

%, zatímco například koncentrace 10 % a 20 % způsobily pokles pouze o 22 % a 27 %. Při maximálním 50% obsahu nastal pokles až na hodnotu $19\,034\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$, což představuje 64 % HTC čisté vody při 5 barech. Podobné chování bylo zjištěno i při chlazení chladivem Rolkeen a lze jej vysvětlit pomocí změny povrchového napětí chlazeného vzorku. Olejové příměsi i v malé koncentraci ovlivňují (ne)smáčivost povrchu a velikost kapek chladiva, což má za následek pokles chlazení.

Uvedené závěry byly publikovány v člancích [31], [32] a [33] a v závěrečných zprávách evropského projektu EWRCOOL.

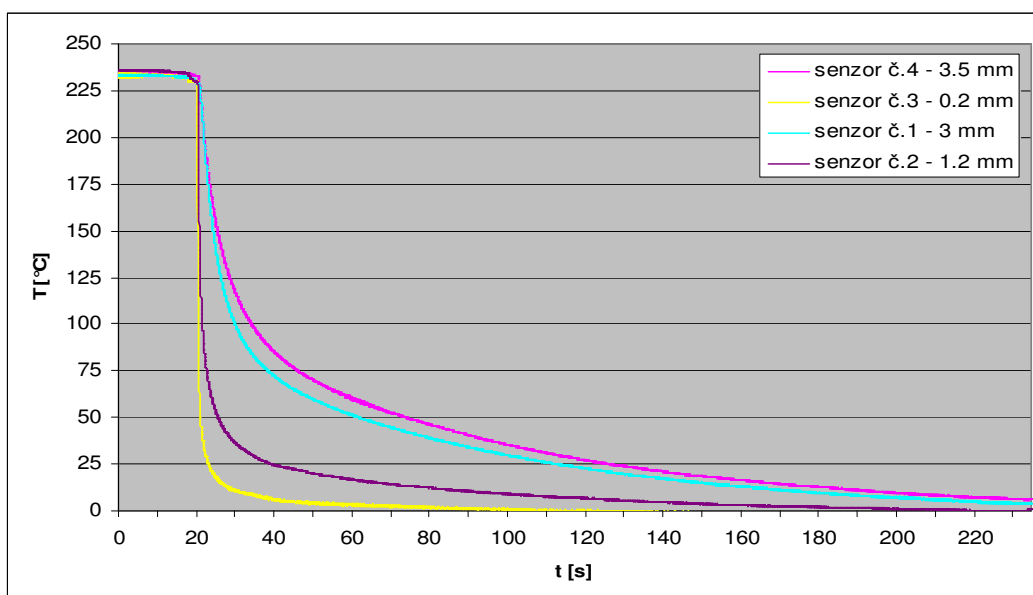
4.5. Řízené chlazení

Pod pojmem řízené chlazení se v této práci uvažují experimenty s přerušovaným chlazením vzorku. Řízené chlazení má zásadní vliv na výslednou materiálovou strukturu chlazeného materiálu. Jako příklad může sloužit IRA diagram pro ocel na obr.4.7 v kap.4.2, který zobrazuje fázovou přeměnu austenitu na perlit. Výsledná perlitická struktura a s ní spojené mechanické vlastnosti je závislá zejména na teplotě, při níž je austenit transformován. Při mnoha aplikacích (např. válcování kolejnic) je proto ocel chlazená na vzduchu. Nevýhodou chlazení vzduchem je nízké HTC a delší doba chlazení. Naproti tomu při použití vodního chlazení s výrazně vyšším HTC, které by zkrátilo dobu chlazení, by došlo k příliš prudkému ochlazení materiálu a přeměně austenitu na martenzit. Obr.4.8 ukazuje alternativní možnost kombinující oba přístupy. Přerušováním vodního chlazení lze teplotu materiálu regulovat a vyrovnávat rozdíly, a dosáhnout tak požadované struktury.

Výsledkem takového chlazení oproti stálému ostříku je sice menší odvod tepla za jednotku času, ale současně i více rovnoměrný teplotní profil chlazeného tělesa s menšími rozdíly teplot. Při nepřetržitém chlazení nastává stav, kdy je povrch výrazně podchlazen, zatímco uvnitř tělesa jsou stále vysoké teploty. Tento teplotní gradient způsobuje v závislosti na velikosti rozdílu teplot mechanické pnutí chlazeného materiálu. Vyrovnáváním teplotních rozdílů lze proto snižovat mechanické napětí a lze tak zabránit vzniku trhlin chlazených prvků při mnoha průmyslových aplikacích.

Experimentální plán (tab.3.2) obsahoval měření řízeného chlazení za použití destilované vody a referenčního tlaku 5 barů. Experimenty byly provedeny s prodlevou chlazení v rozsahu od 5s až po 30s. V grafech na obr.4.33 až 4.36 jsou znázorněny průběhy teplot ve vzorku A, zaznamenané všemi jeho senzory. Každý senzor je zabudován v jiné hloubce pod povrchem (viz. kap.3.3.) a proto má jinou odezvu na chlazení povrchu vzorku. Zejména v prvních okamžicích chlazení je patrný výrazný rozdíl teplot senzoru č.3 vůči senzoru č.4 způsobený podchlazením materiálu blízko povrchu. Např. při nepřerušovaném chlazení vodou (obr.4.33.) je rozdíl po 11s chlazení až 170°C . Oproti tomu obr.4.34.-4.36. zobrazují tytéž grafy pro přerušované chlazení, kdy během prodlevy v chlazení dochází k vyrovnávání teplotních rozdílů. S rostoucí

dobou prodlevy chlazení klesají rozdíly teplot, ale zároveň se prodlužuje doba ochlazování (pozn.: podrobněji v tab.4.1., kde jsou doby a rychlosti ochlazování).

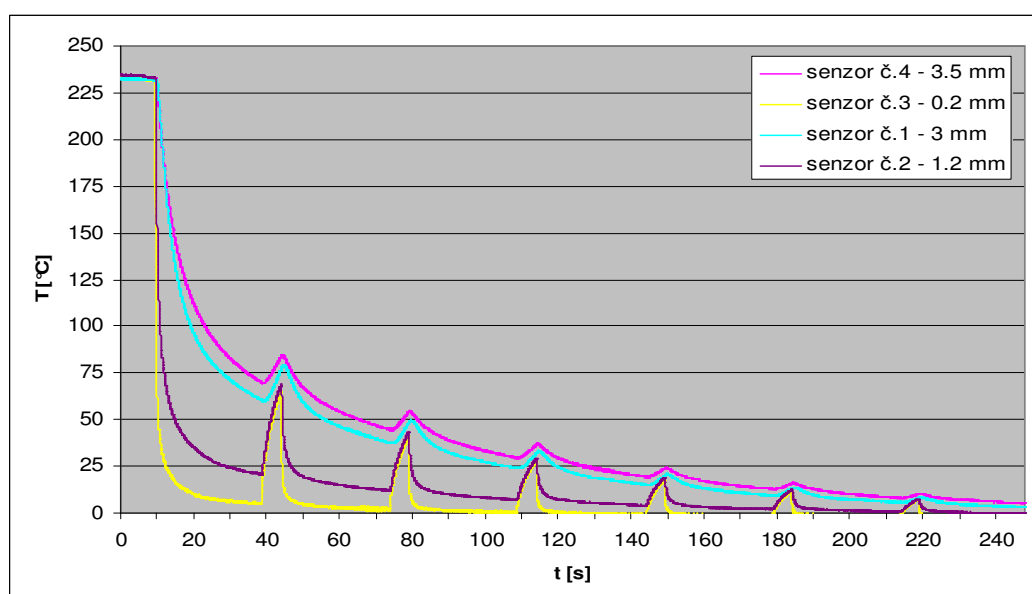


Obr.4.33 Průběh teploty v různých hloubkách pod povrchem (senzor č.1 – 4), chlazení vodou bez přerušení; tlak 5 barů

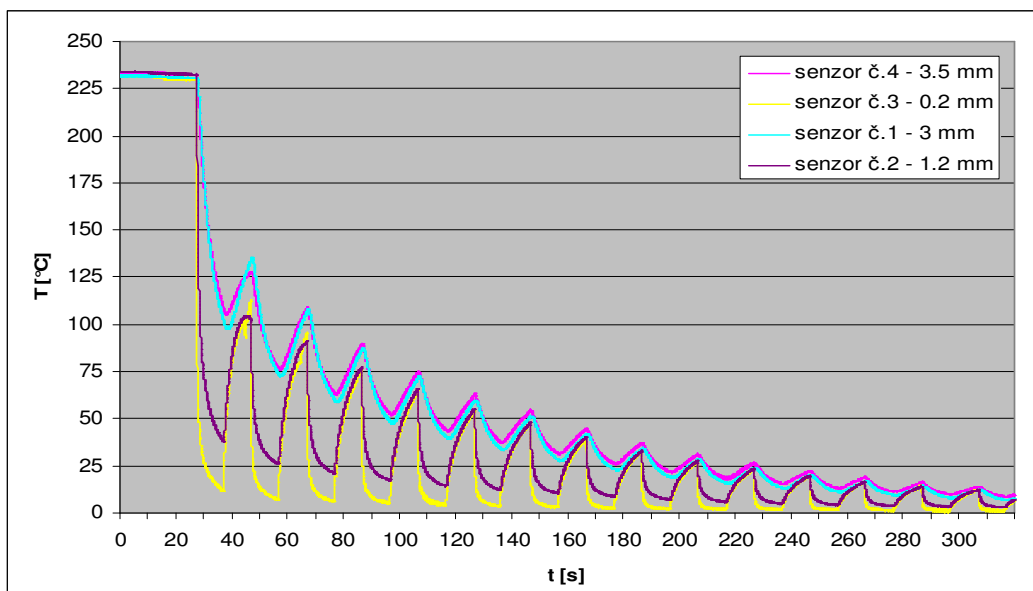
Tab. 4.1. Porovnání délky chlazení

Nastavení experimentu	Doba ochlazení [s]*	Rychlost ochlazování [°C/min]
Chlazení bez přerušení	55	163,6
30s chlazení a 5s prodleva	63	142,8
10 chlazení a 10 prodleva	130	69,2
5 chlazení a 30 prodleva	320	28,1

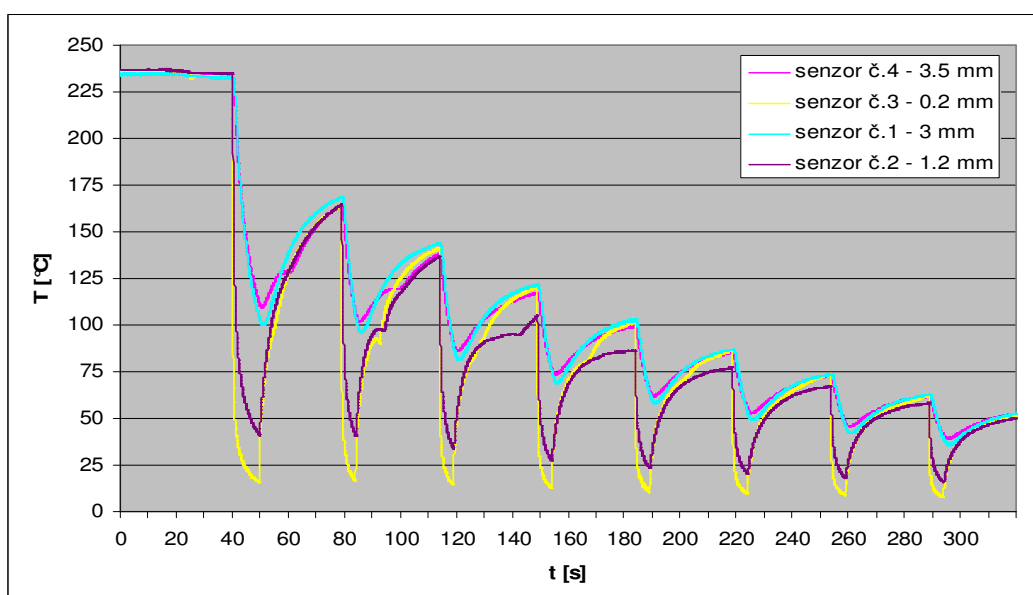
* doba ochlazení, odpovídá ochlazení všech senzorů z počáteční teploty na teplotu pod 50 °C



Obr.4.34. Průběh teploty v různých hloubkách pod povrchem (senzor č.1 – 4), 30s chlazení + 5s přerušení; tlak 5 barů; v momentech kdy je chlazení vypnuté dochází k růstu teplot v důsledku vedení tepla z horkého jádra směrem k povrchu vzorku

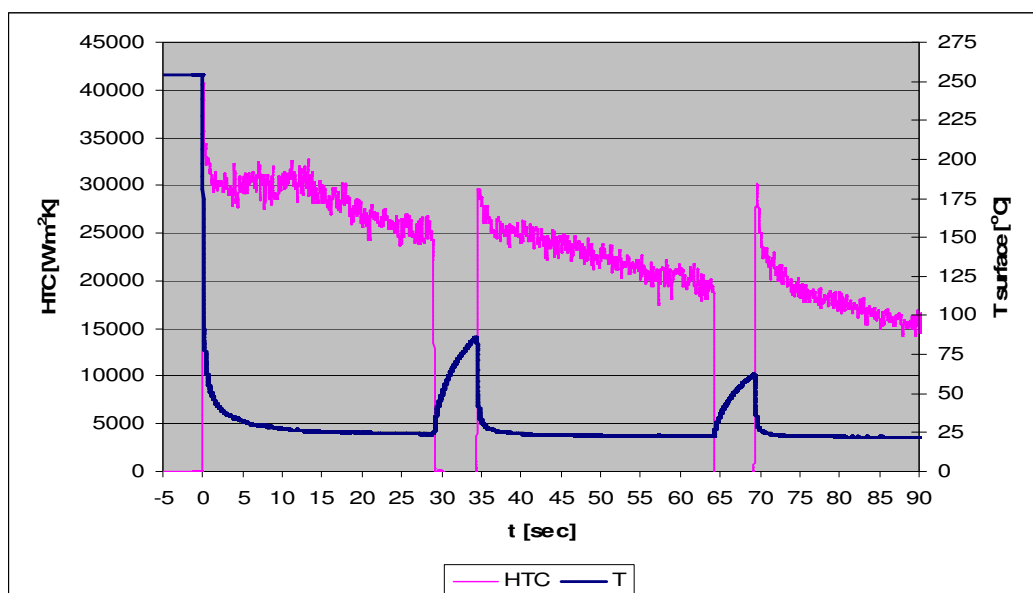


Obr.4.35. Průběh teploty v různých hloubkách pod povrchem (senzor č.1 – 4), 10s chlazení + 10s přerušení; tlak 5 barů; v momentech kdy je chlazení vypnuté dochází k růstu teplot v důsledku vedení tepla z horkého jádra směrem k povrchu vzorku

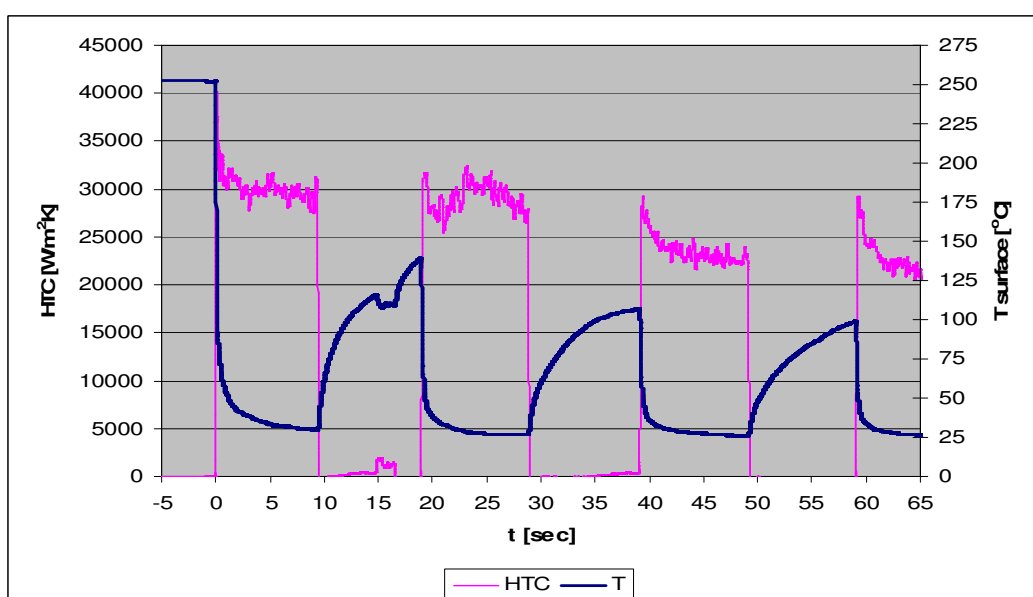


Obr.4.36. Průběh teploty v různých hloubkách pod povrchem (senzor č.1 – 4), 5s chlazení + 30s přerušení; tlak 5 barů; v momentech kdy je chlazení vypnuté dochází k růstu teplot v důsledku vedení tepla z horkého jádra směrem k povrchu vzorku

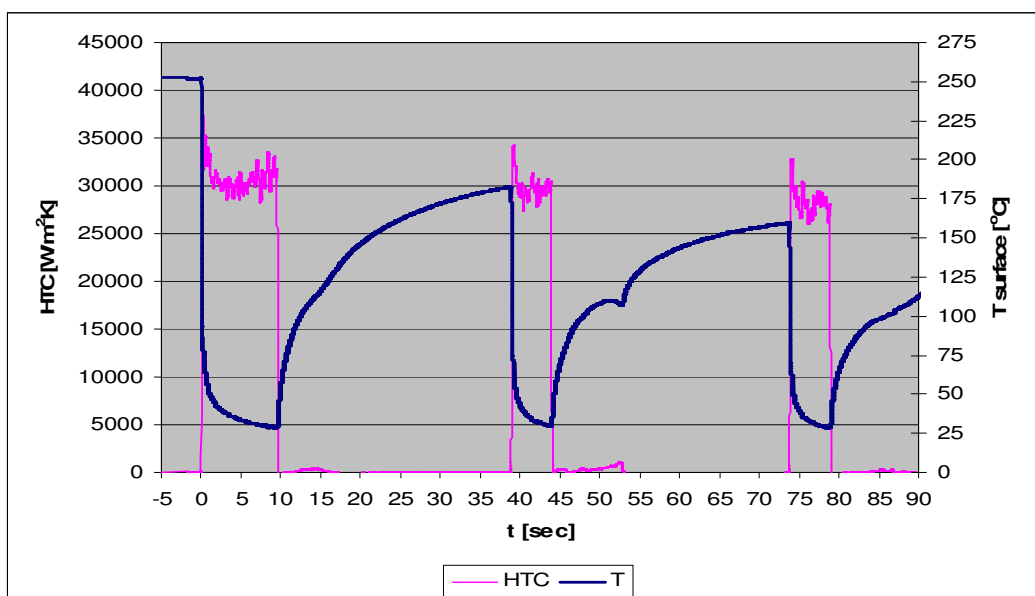
Po provedení série měření s přerušovaným chlazením následoval inverzní výpočet. K inverznímu výpočtu byl opět použit teplotní záznam z čidla č.3. V grafech na obrázcích 4.37. až 4.40 jsou znázorněny teplotní křivky (tmavě modrá křivka) a jim odpovídající HTC (ružová křivka) v čase.



Obr.4.37 Průběh teploty (modrá křivka) a HTC (růžová) v čase (senzor č.3), 30 s chlazení + 5 přerušení



Obr.4.38. Průběh teploty (modrá křivka) a HTC (růžová) v čase (senzor č.3), 10s chlazení + 10s přerušení



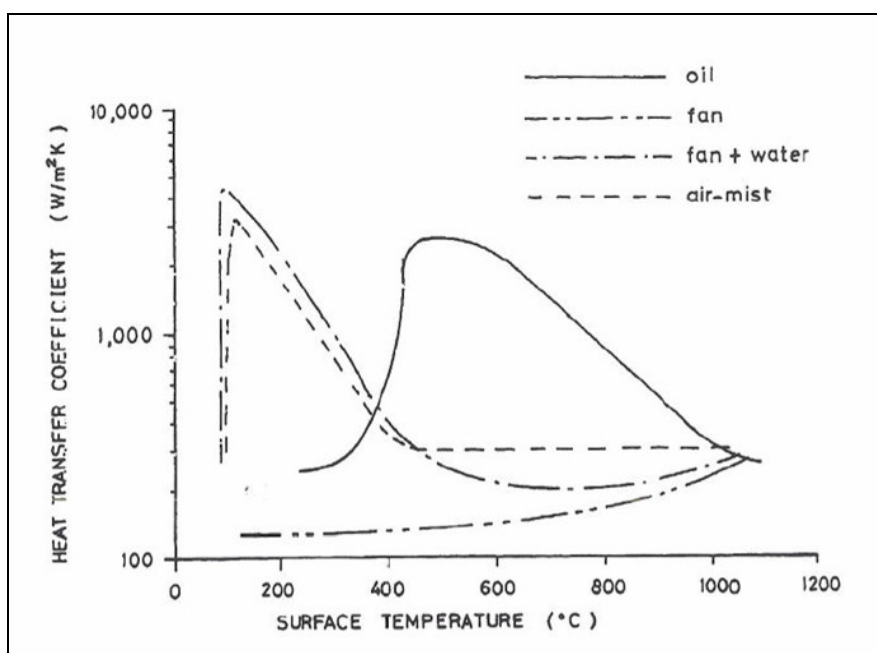
Obr.4.39. Průběh teploty (modrá křivka) a HTC (růžová) v čase (senzor č.3), 5s chlazení + 30s přerušení

Ze zjištěných výsledků vyplývá, že použitím přerušovaného chlazení lze výrazným způsobem ovlivnit rychlost chlazení a teplotní gradient uvnitř chlazeného tělesa. Při chlazení vodou bez přerušování dosáhla rychlost chlazení 163,6 °C/min. Při použití řízeného chlazení v rozsahu zkoumaných nastavení (pozn.: 30s chlazení + 5s teplotního vyrovnávání) se rychlost chlazení pohybovala v rozmezí od 28,1 °C/min až do 142,8 °C/min. Rychlost chlazení přirozenou konvekcí na volném vzduchu, lze stanovit z experimentů se vzorkem B (pozn.: oba vzorky jsou z oceli shodné tloušťky; termočlánky ve stejné hloubce). Přirozená konvekce je nejpomalejší způsob chlazení a pokles teplot byl pouze 5,3 °C/s. Řízené chlazení se proto může v mnoha aplikacích stát vhodným kompromisem mezi extrémně rychlým chlazením vodou a příliš pomalým chlazením na volném vzduchu zejména s ohledem na výslednou materiálovou strukturu chlazeného materiálu. Velký rozsah rychlostí chlazení při použití přerušovaného chlazení lze např. využít k řízení procesu chlazení dříve zmíněného materiálu V140Ti (viz. kap.4.2) s důrazem na optimální výsledné mechanické vlastnosti.

4.6 Srovnání výsledků s publikovanou literaturou

V této části jsou srovnávány výsledky měření s různými typy chladiv vůči publikovaným studiím. Wallis [34] prezentuje výsledky studie chlazení v metalurgickém průmyslu. Z jeho zjištění vyplývá, že vhodné chlazení redukuje výrobní časy a minimalizuje zbytková napětí. Práce je zaměřena na mechanické vlastnosti super-slitin na bázi niklu a titanových výkovků získaných optimálním chlazením. Komponenty vyrobené z těchto materiálů slouží zejména v leteckých motorech. Ve svém článku porovnává účinnost 4 druhů chlazení – olej, nucená konvekce vzduchu (s použitím ventilátoru), ventilátor se vstřikováním vody do proudu vzduchu a chlazení vodo-vzdušnou tryskou. Jako vzorek sloužil disk o průměru 267 mm ze slitiny IN718 (složení: Ni 52%, Fe 19%,

Cr 19%, Nb 5,3%, Mo 3,1%, Ti 0,95%, Al 0,55%) [38], který byl zahříván na 1121 °C a následně zchlazen. Při chlazení olejem (pozn.: olej Sunvis 21) byl vzorek ponořen do nádoby. Při chlazení nucenou konvekcí, resp. s vstřikováním vody byl vzorek umístěn 0,9 m od ventilátoru a měřená rychlost vzduchu se pohybovala od 12,7 – 17,8 m/s a průtok vody 0,95 l/min a 1,9 l/min. Při chlazení vodo-vzdušnou tryskou (pozn.: Spraying system typ ¼ JSU42) byl použit vzorek z nerezové oceli (pozn.: válec o průměru 140 mm a tloušťce 25 mm, 0,8 m od trysky) a průtoky 1,32 l/m (tlak 2,8 bar) vody a 164 l/min (tlak 4,1 bar) vzduchu. Obr.4.40. zobrazuje graf HTC v závislosti na teplotě povrchu (pozn.: rozsah 100 – 1 100 °C). Plná křivka znázorňuje olej, který má maximum HTC přibližně 2 700 W.m⁻².K⁻¹ při 500 °C a v oblastech pod 100 - 400 °C a nad 1000 °C již pouze 250 W.m⁻².K⁻¹. Chlazení nucenou konvekcí dosahuje nejnižších hodnot HTC, ale úměrně s rostoucí teplotou povrchu se zvyšuje (ze 150 W.m⁻².K⁻¹ při 100 °C na 300 W.m⁻².K⁻¹ při 1000 °C). Chlazení vodo-vzdušnou tryskou a ventilátor se vstřikováním vody mají podobné chování. Nejvyšších hodnot HTC dosahují při relativně nízkých teplotách (4 000 W.m⁻².K⁻¹ pro 150 °C) a pro vyšší teploty nízké HTC (200 – 300 W.m⁻².K⁻¹ nad 500 °C). Autor uvádí následující minimální rychlosti chlazení v oblasti teplot 871 – 1093 °C: olej 113 °C/min, vodo-vzdušná tryska 69 °C/min, ventilátor se vstřikováním vody 54 °C/min a samotný ventilátor 54 °C/min. Dále pak uvádí vnitřní napětí ve vzorku způsobené chlazením: olej (max. 1000 MPa), vodo-vzdušná tryska (400 MPa), ventilátor se vstřikováním vody (500 MPa) a samotný ventilátor (100 MPa).



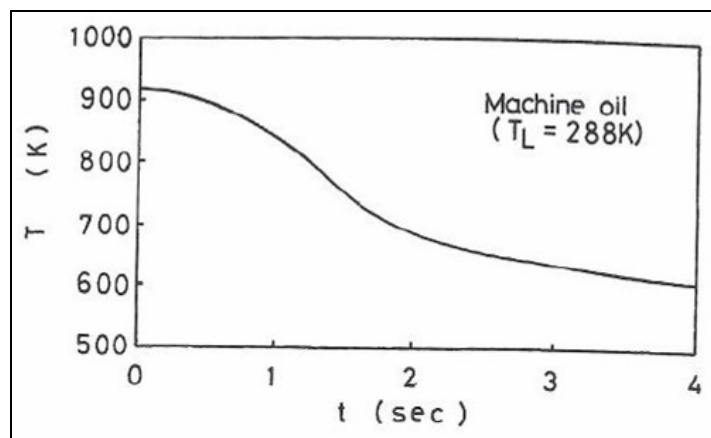
Obr.4.40. Graf HTC v závislosti na povrchové teplotě pro různé druhy chlazení [34]

Japonští autoři [35, 36, a 37] se zaměřují na aplikace při chlazení průmyslového skla a keramiky. Ve své studii popisují chlazení několika typy olejů (minerální, silikonový, vřetenový, turbínový, kompresorový a strojní) v rozsahu teplot 10 – 1000 °C. Fyzikální vlastnosti jimi použitých olejů jsou uvedeny v tabulce 4.2. (pro porovnání viz. kapitola 3.5. Popis

přímíchávaných chemikálií a maziv). Postup experimentu je následovný: vzorek (měděný disk $\Phi 40 \times 3$ mm osazený Cr-Al 1 mm termočlánkem) je zahřát v elektrické peci na potřebnou teplotu a následovně ponořen do chladiva; průběh teploty během chlazení je nahráván do rekordéru, viz. obr.4.41.

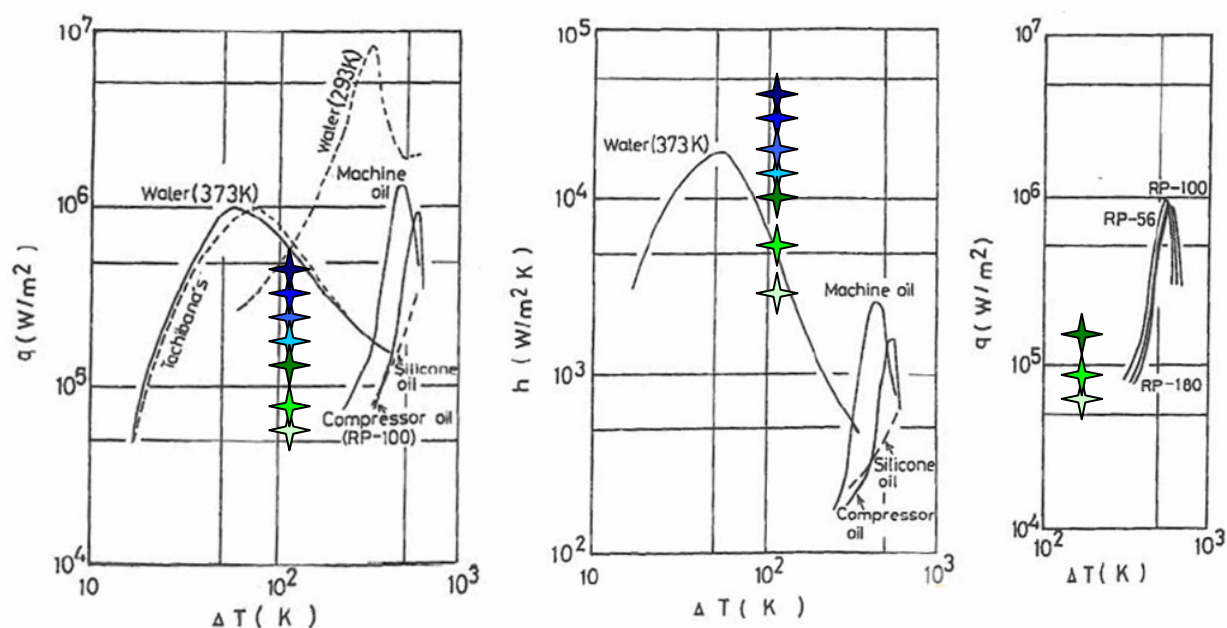
Tab. 4.2. Přehled olejů [35]

Všeobecné fyzikální olejů				
Typ oleje	Hustota [kg.m ⁻³]	Tepelná kapacita [kJ.kg ⁻¹ .K ⁻¹]	Tepelná vodivost [W.m ⁻¹ .K ⁻¹]	Kinetická viskozita [10 ⁶ .m ² .s ⁻¹]
Kompresorový RP-56	874	1,14	0,130	5,58
Kompresorový RP-100	882	1,12	0,130	10,1
Kompresorový RP-180	880	1,12	0,126	18,5
68 - strojní	933	1,09	0,125	6,82
Silikonový VF-33-100	968	0,86	0,149	7,50

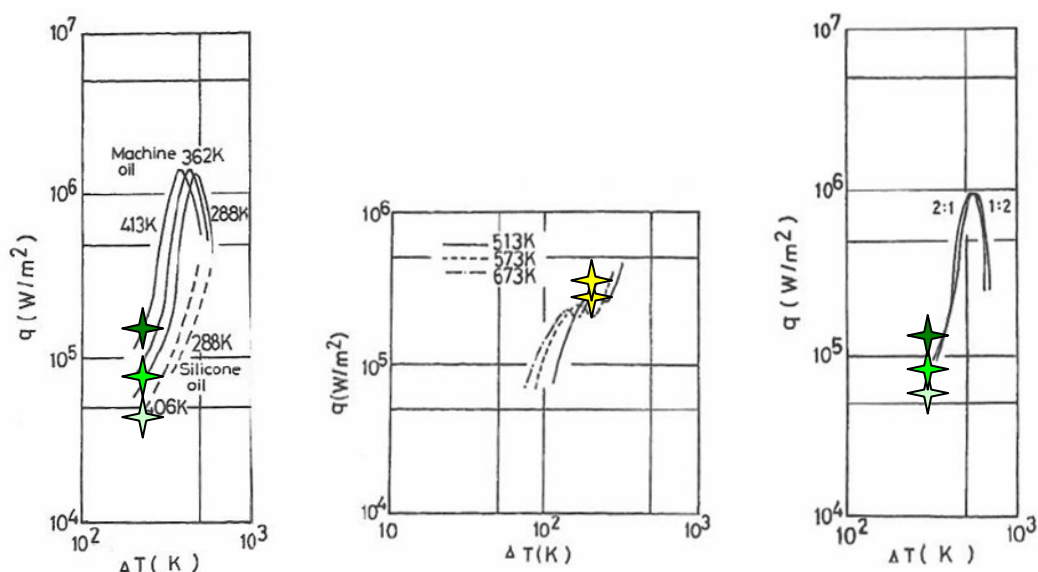


Obr.4.41. Chladicí křivka pro strojní olej, měděný vzorek $\Phi 35 \times 3$ mm po zahřátí ponořen do lázně [35]

Japonští autoři došli k podobným závěrům (viz. obr.4.42 uprostřed) jako Wallis [34] – zatímco voda dosahuje maxima HTC za nízkých teplot (max. HTC 12 000 W.m⁻².K⁻¹ pro 150 °C), pak oleje chladí nejvíce při vysokých teplotách (1 000 – 3 000 W.m⁻².K⁻¹ v rozmezí 500-700 °C v závislosti na druhu oleje). U vody za vyšších a u olejů za nižších teplot dochází k výraznému poklesu HTC – voda méně než 500 W.m⁻².K⁻¹ a olej 200 – 300 W.m⁻².K⁻¹. Z grafů (obr.4.42 vlevo a uprostřed) taktéž vyplývá rozdílný HTC a tepelný tok pro různé typy olejů – např. strojní olej dosahuje vyššího maxima než kompresorový a to za nižších teplot. Naopak nebyly nalezeny žádné rozdíly pro olej s různou kinetickou hustotou (kompresorový olej ~ 5,58 – 18,5 x 10⁶ m².s⁻¹), viz. obr.4.43 vpravo. Podobně minimální je i vliv samotné teploty chladícího oleje (obr.4.43 vlevo) znázorňující tepelný tok pro strojní a silikonový olej v rozsahu teplot 288 – 413 K (14,85 – 139,85 °C). Pro porovnání s experimenty zaměřenými na tvrdost vody je níže uveden graf (viz. obr.4.43 uprostřed), ukazující tepelný tok pro roztok anorganických solí (70KNO₃ + 15NaNO₃ + 15 NaNO₂), opět v závislosti na teplotě chladiva. Poslední závislost – směsné poměry olejů – je presentována na obr.4.43 vpravo. Rozdíly jsou v tomto případě taktéž minimální.



Obr.4.42. Tepelný tok (vlevo) a HTC (uprostřed) pro vodu, strojní, silikonový a kompresorový olej; tepelný tok (vpravo) pro oleje s různou kinetickou viskozitou [35]; porovnání s výsledky této práce: modré body zobrazují výsledky pro vodu (tlak 1 (nejsvětlejší modrá), 3, 5 a 10 barů (nejtmavší)) a zelené body olej Somentor 34 (tlak 1 (nejsvětlejší), 3 a 5 barů (nejtmavší)) měřené v LPTaP



Obr.4.43. Tepelný tok – vlevo pro oleje různých teplot; uprostřed pro vodní roztok solí ($70\text{KNO}_3 + 15\text{NaNO}_3 + 15\text{NaNO}_2$); vpravo pro různé poměry směsí kompresorového oleje [35]; porovnání s výsledky této práce: žluté body zobrazují výsledky pro vodu s příměsí solí (tlak 5 Barů, různé koncentrace) a zelené body olej Somentor 34 (tlak 1 (nejsvětlejší), 3 a 5 barů (nejtmavší)) měřené v LPTaP

Přestože jsou ostřížkové parametry rozdílné (rozdílné testovací zařízení, průtoky, materiál vzorku, ...) lze říci, že výsledky této práce jsou srovnatelné s publikovanou literaturou. V grafech na obr.4.42 a 4.43 jsou zobrazeny barevné body odpovídající hodnotám HTC experimentálně zjištěným v LPTaP. Ať porovnáváme jakýkoliv typ oleje nebo směsi olejů, tak pro teploty pod 250°C je HTC výrazně nižší než pro čistou vodu. Porovnáváme-li výsledné HTC získané

Tachibanou [36] pro vodu, lze je srovnávat s hodnotami HTC při tlaku 1 bar. HTC pro strojní olej uváděné Shin'ichim [35] lze srovnávat s výsledky pro olej Somentor 34 při tlaku 3 bary. Výsledky pro roztok solí dle [35] odpovídají hodnotám HTC pro experimenty s tvrdostí vody. Pro přehlednost je v tab.4.3. uvedeno porovnání HTC z [35-37] a měřených v LPTaP.

Tab. 4.3. Porovnání HTC dle autorů a chladiv

Porovnání HTC					
autor	Wallis [34]		Japonští autoři [35-37]		LPTaP
rozsah teplot [°C]	100 - 400	400 - 1000	100 - 400	400 - 1000	50 - 250
nucená konvekce [W.m ⁻² .K ⁻¹]	150	300	n/a	n/a	n/a
voda [W.m ⁻² .K ⁻¹]	4 500	250	12 000	500	15 800 ¹
					20 750 ¹
					29 500 ¹
					34 900 ¹
					42 300 ¹
vodo-vzdušná tryska [W.m ⁻² .K ⁻¹]	4 000	300	n/a	n/a	n/a
olej [W.m ⁻² .K ⁻¹]	250	2700	150 ²	3 000 ²	3 900 ³
			150 ²	2 000 ²	5 350 ³
			150 ²	1 000 ²	10 300 ³

¹ tlak vody 1,3, 5, 7 a 10 barů

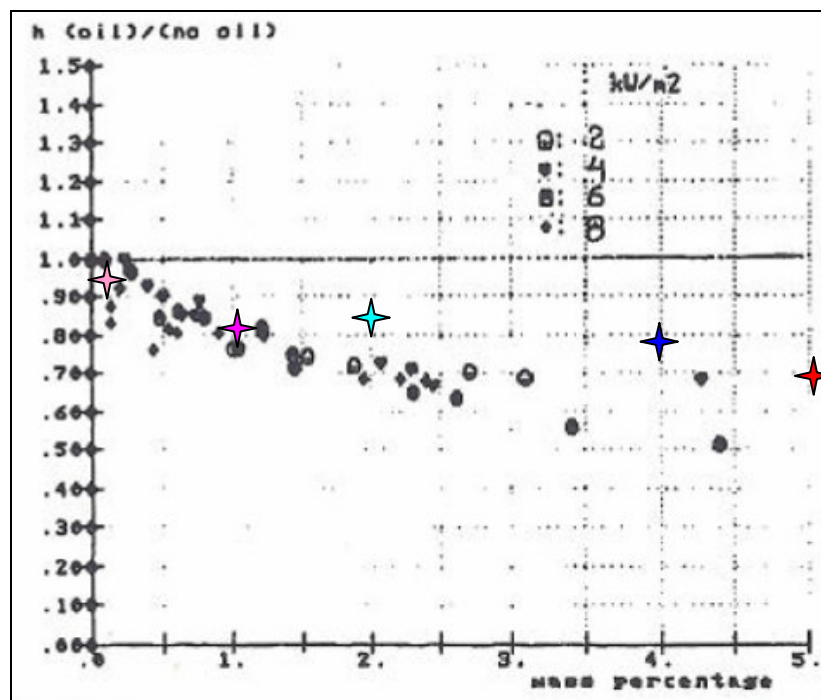
² strojní, kompresorový a silikonový olej

³ olej Somentor 34, tlak 1, 3 a 5 barů

K zajímavým zjištěním dospěla autorka [39], kde zkoumala vliv olejových příměsí na velikost HTC pro chladivo HFC 134a (CH₂FCF₃ – tetra-fluor-etan, [40, 41]). HFC 134a (nebo též R-134a) je nejběžnější technické chladivo používané jak v průmyslu (např. automobilové klimatizace, plnicí složka pěnidel), tak v domácnostech (např. lednice, klimatizace). Zkoumány byly dva typy oleje na bázi esteru s různou mísitelností a viskozitou v koncentracích 0 – 5 % . Vliv oleje na chlazení je zde taktéž negativní. Experimenty probíhaly v okruhu složeném z výparníku, vodou chlazeného kondenzátou, čerpadla a kompresoru. Výsledné hodnoty HTC, resp. jejich pokles v závislosti na procentuálním obsahu oleje jsou znázorněny na obr.4.44. Z tohoto je patrné, že i velmi malý obsah oleje způsobí výrazný pokles intenzity chlazení (např. při 2% oleje poklesne HTC až o 30 %). K podobným závěrům došel i Chaddock a Buzzard [42] pro chladivo HCFC502 (pozn.: R-502, směs R-22 a R-115) ve směsi s olejem (obsah více než 1 %) a Schlager [43] pro směs oleje (> 5 %) a HCFC22 (pozn.: difluor-chlor-methan nebo též R-22). Obě látky patří mezi měkké freony (pozn.: tzv. HCFC-freony, hydro-chlor-fluor-uhlovodíky) sloužící jako chladicí náplně, pěnící plniva. Pro porovnání s [39] jsou v tab.4.4. uvedeny procentuální poklesy HTC v závislosti na koncentraci oleje naměřených v LPTaP pro Lubrodal RM192 a Somentor 34.

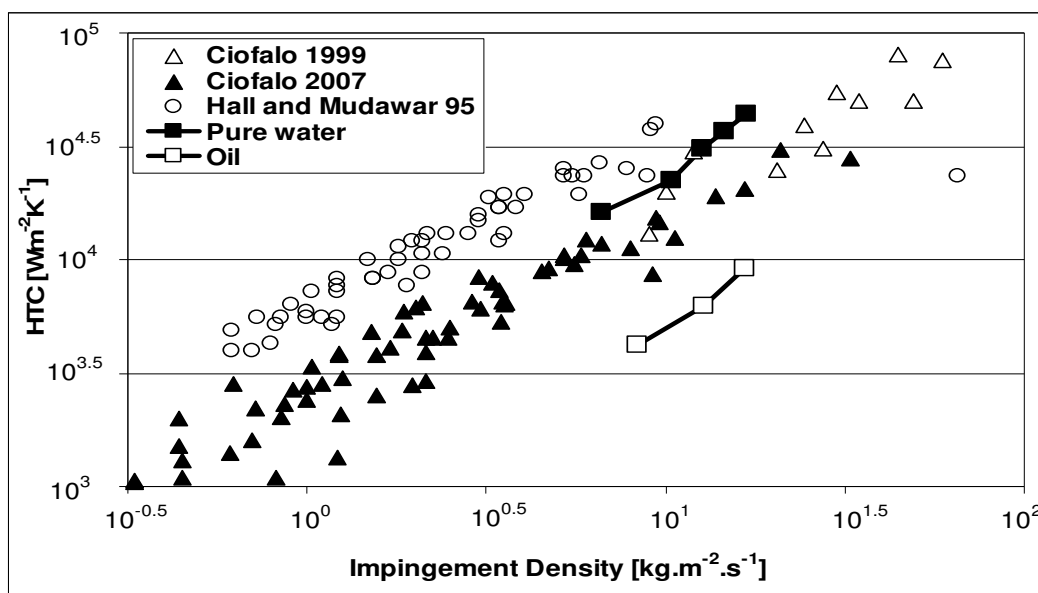
Tab. 4.4. Porovnání HTC pro [39] a LPTaP dle % oleje

Porovnání HTC							
autor	Hambræus [39]						
rozsah koncentrací [%]	0	0,5	1	1,5	2	3	4,5
HFC134a, změna HTC [%]	0	- 12	- 22	- 25	- 28	- 30	- 40
LPTaP							
autor	LPTaP						
rozsah koncentrací [%]	0	0,1	1	5	10	20	50
Lubrodal RM192, změna HTC [%]	0,0	-7,8	-17,7	-19,6	-22,7	-27,4	-35,6
rozsah koncentrací [%]	0		2		4		
Somentor 34, změna HTC [%]	0,0		-15,8		-20,2		



Obr.4.44. Relativní poměr HTC v závislosti na % oleje; $h_{oil}/h_{no\ oil} = 1,0$ referenční hodnota bez oleje; autorka [35] značí součinitel přestupu tepla h ; porovnání s výsledky této práce: modré body zobrazují výsledky pro Rolkleen DP 2062 (koncentrace 2 % (světle modrá) a 4 % (tmavá), tlak 5 Barů) a červené body olej Lubrodal RM192 (koncentrace 0,1 % (nejsvětější), 1 % a 5 % (nejtmavší), tlak 5 barů) měřené v LPTaP

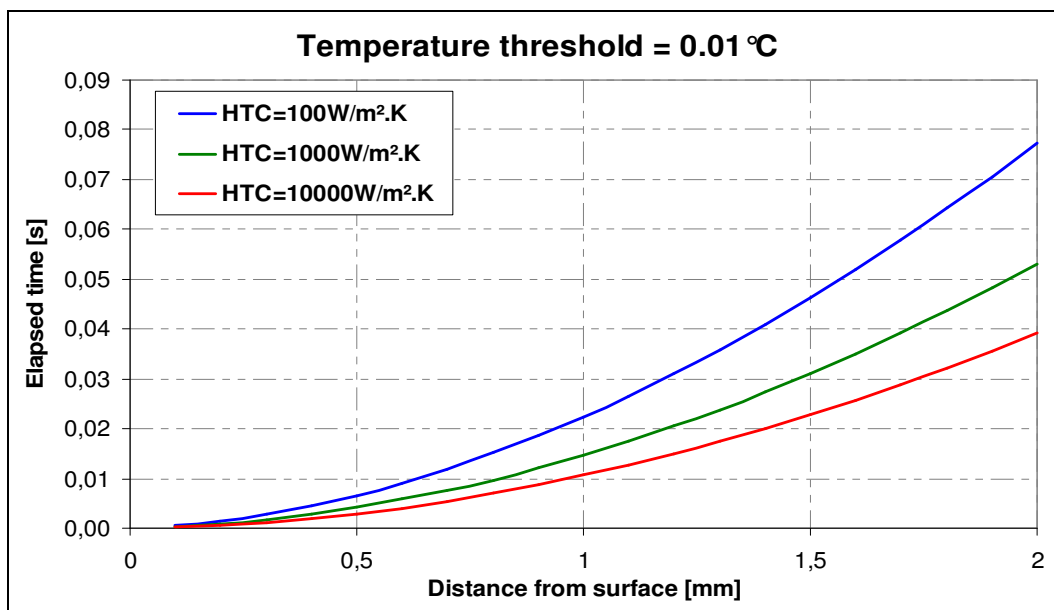
Mudawar [45] a Ciofalo [46, 47] publikovali studie vlivu hustoty dopadající vody (pozn.: „Impingement Density“, $[\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}]$) na velikost HTC. Graf na obr.4.45 ukazuje porovnání výsledků [45, 46, 47] vůči výsledkům LPTaP. Tyto výsledky jsou nejlépe srovnatelné, protože všechny experimenty byly provedeny za nízkých teplot (pozn.: od 30 °C do 200 °C) a za použití tzv. full-cone trysek (pozn.: trysky s kuželovým rozstříkem chladiva). Hodnoty HTC pro destilovanou vodu (pozn.: označeno „Pure water“) jsou blízké hodnotám publikovaným v [45, 46, 47], Somentor 34 (pozn.: označeno „Oil“) naopak vykazuje výrazné nižší hodnoty průměrného HTC.



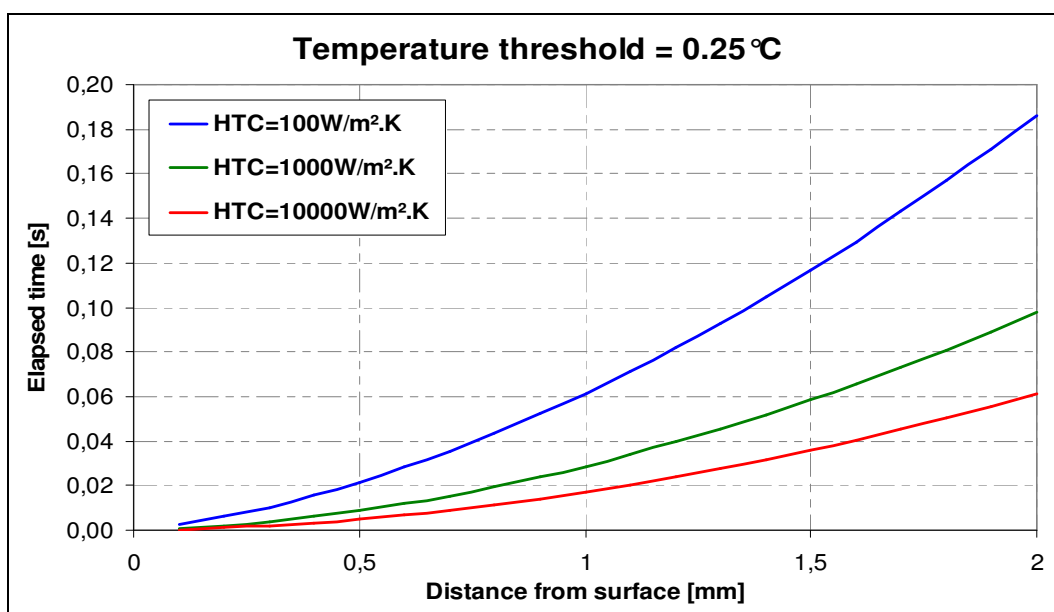
Obr.4.45. Porovnání průměrných HTC při nízkých teplotách povrchu (pozn.: 200 – 30 °C); „Pure water“ a „Oil“ – měření s čistou vodou a olejem Sommentor 34 v LPTaP [31]

4.7. Měření s více senzory

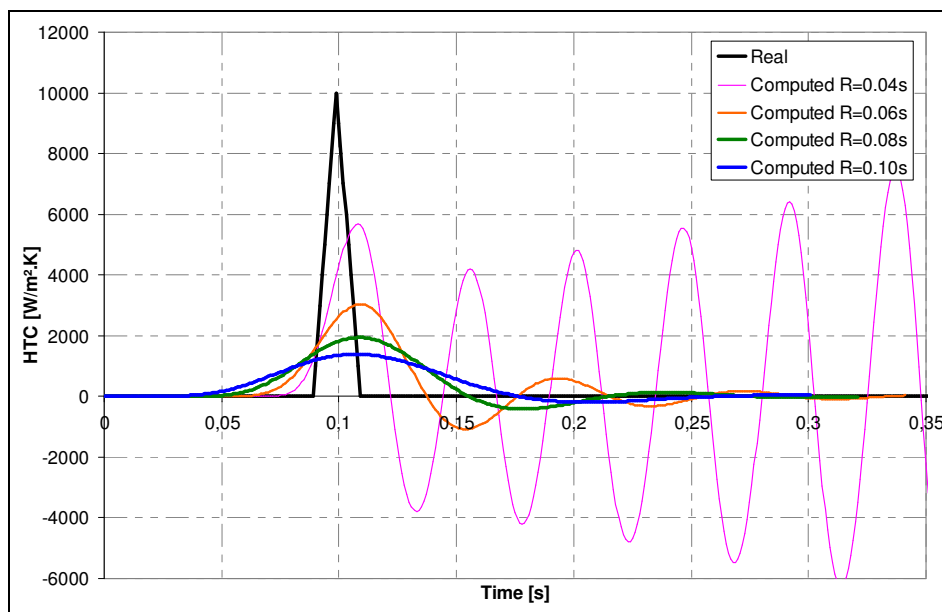
V předchozích kapitolách (4.2 a 4.3) se k vyhodnocování účinnosti chlazení používalo výhradně čidlo č.3, které je zabudováno nejbližší povrchu a díky tomu dosahuje nejrychlejší odezvy na chladicí impuls. Jak už bylo dříve zmíněno v kap. 3.3., čidlo č.3 bylo zabudováno 0,2 mm pod povrchem, zatímco čidla č.2 v 1,2 mm, č.1 ve 3 mm a č.4 ve 3,5 mm. Vzdálenost měřicího bodu pod povrchem vzorku dramaticky ovlivňuje samotný inverzní výpočet. S rostoucí vzdáleností měřicího bodu od povrchu roste i časová prodleva šíření impulsu a tím se výrazně snižuje rychlost odezvy čidla. Zároveň se snižuje jeho přesnost a zvyšuje se negativní vliv šumu. Čidlo ve větší hloubce tak není schopné zaznamenávat rychlé a krátké impulsy. Pohanka [44] odvodil základní charakteristiky a limity použití inverzní úlohy pro homogenní těleso. Ve své práci zkoumal vlastnosti čidel v různých hloubkách pod povrchem a to až do 2 mm. Uvažoval procesy během hydraulického odkujování ocelové desky. Model popisoval ocelovou desku o teplotě $T = 1000^{\circ}\text{C}$ chlazenou vysokotlakým proudem vody o teplotě 0°C působící chladicí impuls délky 0,01s v rozsahu $100 - 10\,000\text{ W.m}^{-2}\text{.K}^{-1}$. Na obr.4.46. je patrná závislost mezi dobou odezvy a hloubkou, ve které je teplota snímána. Rychlost odezvy je ovlivňována nejen hloubkou teplotního senzoru, ale i jeho přesností [44]. Obr.4.46. zobrazuje průběh závislosti doby odezvy na hloubce pro senzor s maximálním rozlišením $0,01^{\circ}\text{C}$. Snížíme-li rozlišovací přesnost senzoru na 0,25 K, dojde k prodloužení doby odezvy, např. v hloubce 2 mm při pulzu $100\text{ W.m}^{-2}\text{.K}^{-1}$ z 0,077s na 0,186s (viz. obr.4.47). Dalším důležitým parametrem inverzního výpočtu je počet dopředných kroků. Vhodný počet kroků lze určit např. ze závislosti popsaného grafem na obr.4.46. Pro rekonstrukci trojúhelníkového impulsu HTC s maximem $10\,000\text{ W.m}^{-2}\text{.K}^{-1}$ v hloubce 2 mm při použití vzorkovací frekvence 1000 Hz je nutné použít výpočet s min. 40 dopřednými kroky (tj. 0,04s). Použitím 40 a méně dopředných kroků získané řešení diverguje, viz obr.4.48.



Obr.4.46. Graf průběhu časové odezvy v závislosti na hloubce teplotního senzoru pro $HTC = 100, 1\,000$ a $10\,000\text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$; přesnost senzoru max. $0,01\text{ °C}$ [44]



Obr.4.47. Graf průběhu časové odezvy v závislosti na hloubce teplotního senzoru pro $HTC = 100, 1\,000$ a $10\,000\text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$; přesnost senzoru max. $0,25\text{ °C}$ [44]



Obr.4.48. Graf průběhu HTC v čase pro 40, 60, 80 a 100 dopředných časových kroků; vzorkovací frekvence 1000 Hz, přesnost senzoru max. 0,01 °C [44]

Na rozdíl od [44] jsou v této práci uvažovány teplotní senzory jako nehomogenní těleso. Model uvažuje reálnou geometrii senzoru, tj. několik různých vrstev různých tloušťek s různými materiálovými vlastnostmi. Každý ze 4 druhů senzorů tak má svůj specifický matematický model založený na základě detailní analýzy provedené v kapitole 3.3. Možnosti jakéhokoli matematického modelu stanovit okrajovou podmínku závisí na použitém senzoru (např.: na přesnosti měřicího prvku senzoru a rychlosti odezvy), dále pak na tvaru a dynamice chladicího pulzu, šumu v datech či počtu dopředných kroků. V této části jsou proto popsány limity použitelnosti jednotlivých druhů senzorů.

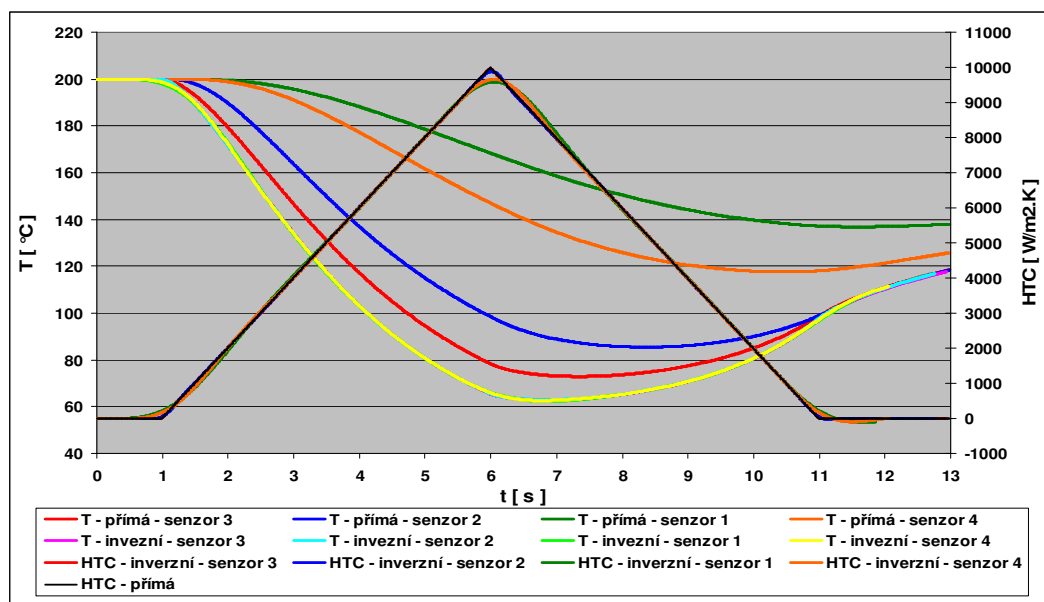
Postup rozboru byl následující: nejprve byl pomocí přímé úlohy s předem definovanou okrajovou podmínkou (HTC) stanoven teoretický průběh teplot pro každý senzor. Teplotní průběh pak sloužil jako vstup pro inverzní úlohu, jejímž výstupem byly křivky HTC, které byly srovnávány s původní okrajovou podmínkou přímé úlohy. Teplotní průběhy byly pro některé výpočty uměle upravovány tak, aby simulovaly reálné chování čidel během experimentu. V těchto případech byla jednak snižována rozlišovací schopnost senzoru z 0,01 K na 0,25 K a dále byl do dat dodáván šum v rozsahu ± 1 K. Výpočty byly rozděleny jednak na rekonstrukci dlouhých časových pulzů v trvání v řádu sekund a krátkých časových pulzů v rozsahu zlomků sekund. Celkově bylo provedeno přes 80 simulací různých nastavení parametrů s celkovým výpočetním časem přes 2 500 h.

Dlouhý časový pulz

Chlazení během dlouhého časového pulzu probíhalo po dobu 10s při vzorkovací frekvenci 100 Hz. Simulace byly prováděny na trojúhelníkovém pulzu s maximem $100 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$, $1\,000 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$ a $10\,000 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$. Výpočty byly prováděny s různým počtem dopředných kroků. Časová diskretizace byla pro všechny výpočty stejná (pozn.: odpovídala vzorkovací frekvenci 100

Hz). Pro některé výpočty byl použit též obdélníkový tvar chladicího pulzu s maximem $1\,000\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$. Dlouhé pulzy byly aplikovány na všechny čtyři typy senzorů, představovaly první polovinu všech simulací.

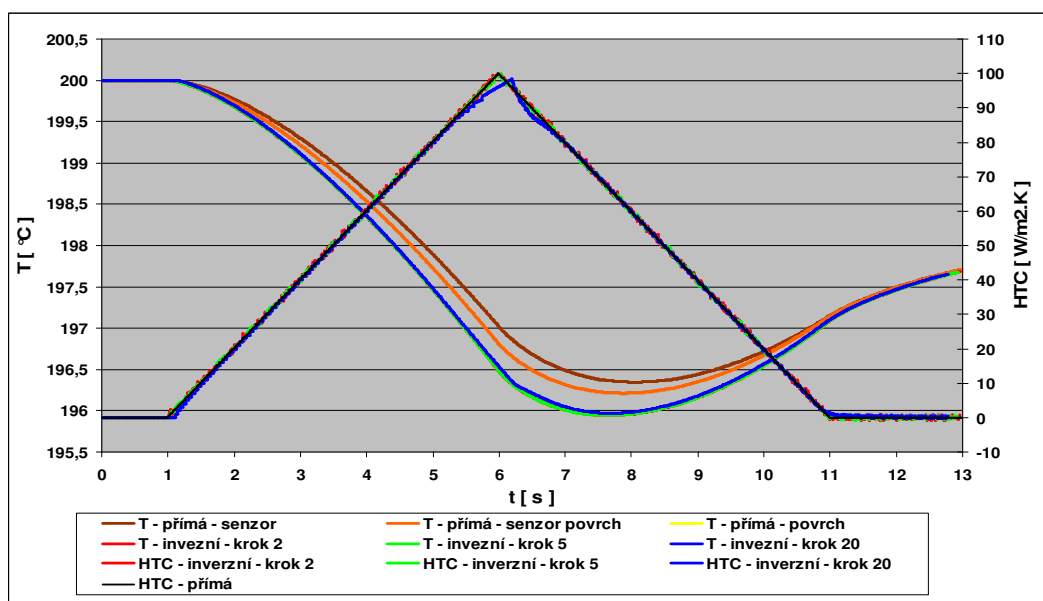
Graf na obr. 4.49. zobrazuje průběh teplot a HTC pro trojúhelníkový pulz s maximem $10\,000\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$. Teplotní křivky zobrazují pokles teplot z počáteční hodnoty 200°C pro všechny čtyři typy senzorů umístěných v různých hloubkách. S rostoucí hloubkou senzoru pod povrchem se zmenšuje velikost teplotního poklesu. Křivky v legendě grafu označené jako „T - přímá“ zobrazují průběh teplot uvnitř daného senzoru vypočtené přímou úlohou. Označení „T - inverzní“ pak udává průběh teploty povrchu vzorku získanou inverzním výpočtem. Jako povrch vzorku je zde uvažováno místo na povrchu mimo samotný senzor, které již není senzorem teplotně ovlivněno (pozn.: senzor se chová se jako tepelný odpor). Povrchové teploty vypočítané rozdílnými modely se téměř v celém intervalu překrývají. Na vedlejší ose vpravo jsou vyneseny hodnoty HTC. HTC vypočtené pomocí inverzní úlohy se velice blíží původnímu trojúhelníkovému pulzu z úlohy přímé. Rozdíly jsou patrné pouze v místech prudkých nehladkých zlomů, kde dochází k vyhlazování průběhu. Toto vyhlazování je odvislé od hloubky senzoru a počtu dopředných časových kroků. V tomto případě výpočty proběhly s 5 kroky pro senzor č.3, 22 pro č.2, 92 pro č.4 a 113 pro č.1. HTC získané inverzním výpočtem za použití senzoru č.3 je proto nejpřesnější. S rostoucí vzdáleností senzoru od povrchu a rostoucím počtem časových kroků roste vliv vyhlazování v nehladkých bodech křivky HTC.



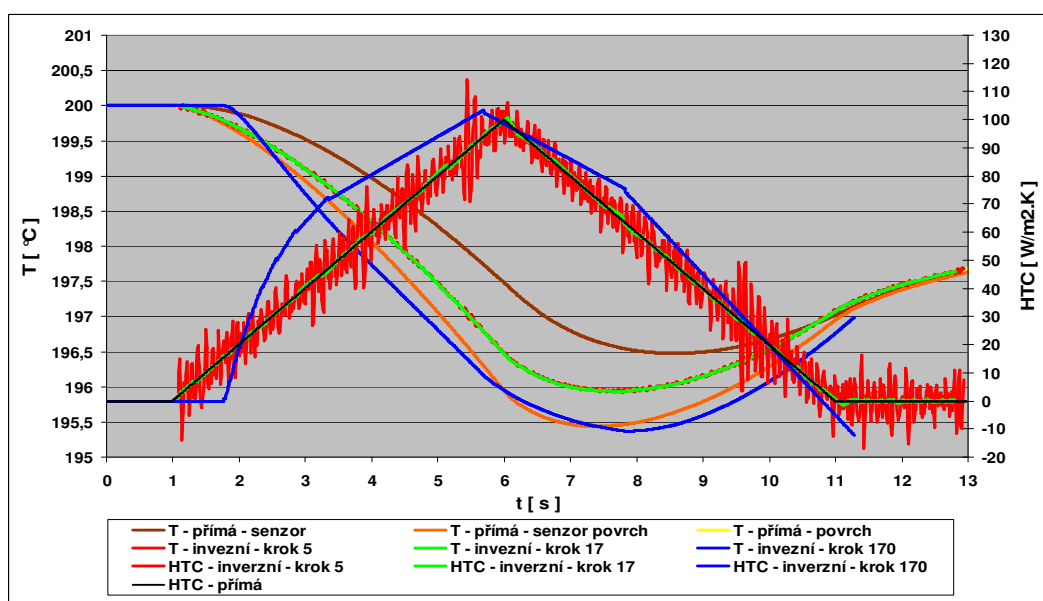
Obr.4.49. Průběhy teplot a HTC pro všechna čidla a trojúhelníkový pulz s maximem $10\,000\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$

Počet dopředných časových kroků má výrazný vliv jednak na přesnost řešení a taktéž výrazný vliv na potřebné výpočetní kapacity. Zatímco výpočet pomocí nejrychlejšího senzoru č. 3 trval pouze několik hodin, pak v případě senzoru č.1 to bylo v několik dní. Vliv počtu dopředných kroků na přesnost řešení je znázorněna v následujících grafech 4.50 - 4.52. Tyto výpočty byly

provedeny s trojúhelníkovým pulzem o maximu $100 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$ a to nejprve s optimálním počtem dopředných časových kroků následované výpočty se sníženým resp. zvýšeným počtem kroků. Graf 4.50. zobrazuje výsledky pro nejrychlejší senzor č.3. Původní optimální počet pěti dopředných kroků (zelné křivky) byl nově změněn na dva (červené) a následovně na dvacet dopředných časových kroků (modré). Změna počtu časových kroků v tomto případě neměla vzhledem k hloubce (pozn.: senzor nejbližší povrchu) a krátké reakční době senzoru výrazný vliv na průběh HTC, pouze maximum HTC při použití 20 dopředných časových kroků se posunulo v čase o 0,25s.

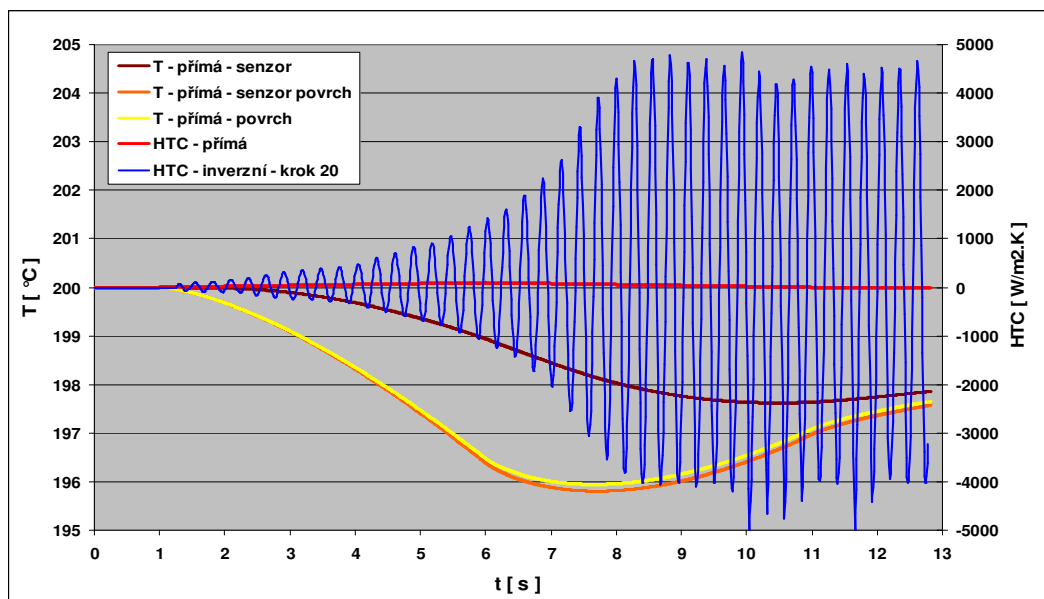


Obr.4.50. Průběhy teplot a HTC pro čidlo č.3 a trojúhelníkový pulz s maximem $1100 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$; dopředných kroků 2, 5 a 20; „T – přímá - senzor“ označuje v grafu teploty získané přímo úlohou přímo v senzoru. „T – přímá – senzor povrch“ označují teplotu povrchu vzorku v místě senzoru zatímco „T – přímá – povrch“ pak teplotu povrchu mimo senzor.

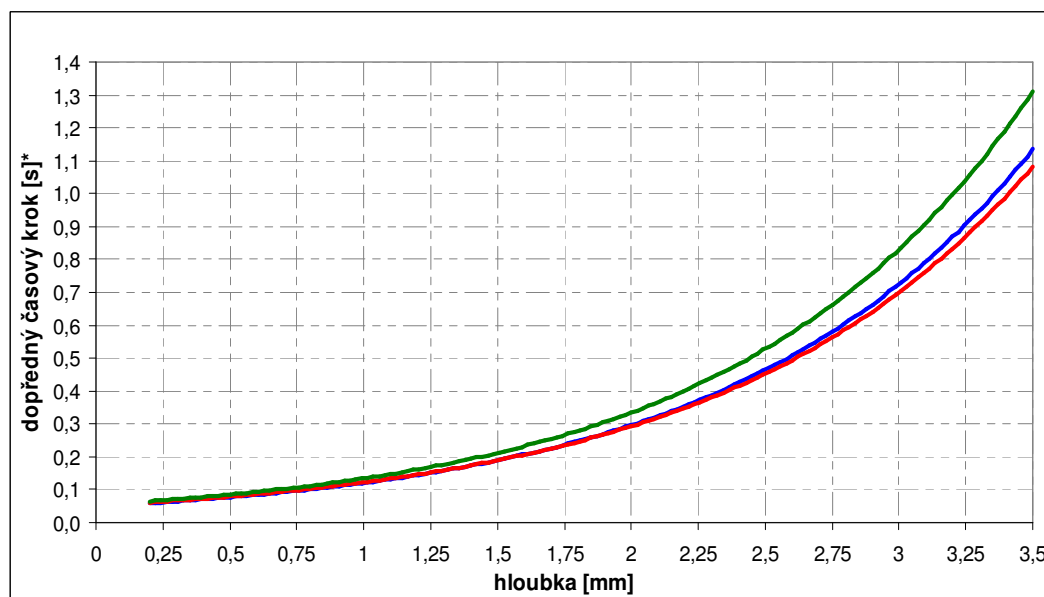


Obr.4.51. Průběhy teplot a HTC pro čidlo č.2 a trojúhelníkový pulz s maximem $100 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$; počet dopředných kroků 5, 17 a 170

Tentýž postup v případě senzoru č.2 (obr.4.51) přinesl snížením počtu časových kroků výrazný nárůst šumu v HTC (červená křivka). Naopak při zvýšení počtu dopředných kroků došlo k výrazné tvarové deformaci HTC (modrá). Při výpočtu s optimálním počtem časových kroků (zelená) se inverzní HTC velice blíží výsledku přímé úlohy (černá). V případě senzorů zabudovaných ve větších hloubkách (např. č.4 na obr.4.52) změnou dopředného kroku dochází k fatálním následkům. Zmenšení počtu kroků z optimálních 79 na 20 vede k divergentnímu řešení, jež osciluje kolem časové osy. HTC spočtené inverzní úlohou (modrá křivka) se pohybuje v intervalu $-5\,000$ až $+5\,000\text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$, zatímco přímá úloha (červená) pouze mezi $0\text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$ a $100\text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$.



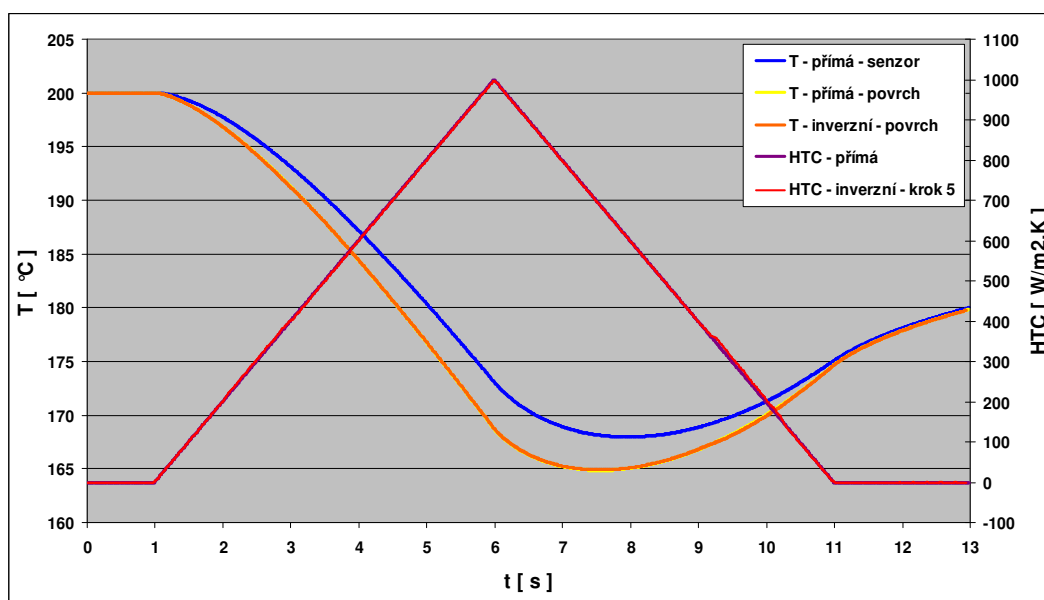
Obr.4.52. Průběhy teplot a HTC pro čidlo č.4 a trojúhelníkový pulz s maximem $100\text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$; počet dopředných kroků 20 (optimum 79 kroků)



Obr.4.53. Závislost mezi počtem dopředných časových kroků a hloubkou senzoru pod chlazeným povrchem; $100\text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$ červená křivka, $1\,000\text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$ modrá křivka a $10\,000\text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$ zelená křivka

Z analýzy vlivu počtu dopředných kroků lze vyvodit postup optimálního odhadu počtu dopředných časových kroků. Obr. 4.53. znázorňuje závislost mezi optimální délkou dopředného časového kroku (*resp. počtem dopředných časových kroků při dané vzorkovací frekvenci; v tomto případě 100 Hz) a hloubkou senzoru pod ochlazeným povrchem. Počet časových kroků je exponenciální funkcí hloubky senzoru. Vliv velikosti pulzu HTC na délku dopředného kroku není příliš velký. Rozdíly mezi pulzem $100 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$ a $10\,000 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$ se projevují až ve větších hloubkách.

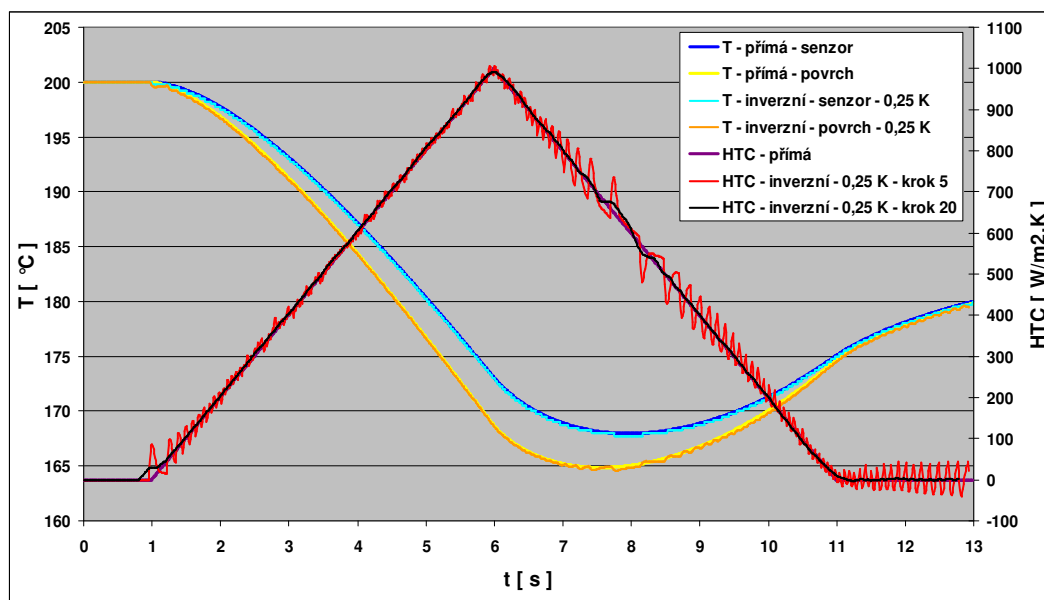
Dalším důležitým aspektem ovlivňujícím inverzní výpočet je vstupní signál. V následující části byl zkoumán vztah mezi kvalitou vstupního signálu (pozn.: měřenou teplotou) a výsledným výstupem z inverzního výpočtu (pozn.: HTC). Doposud byl uvažován ideální vstupní signál, a to bez šumu a bez nepřesnosti měřicího zařízení (pozn.: teplotní záznam pro výpočet byl s max. přesností $0,01^\circ\text{C}$). V běžné praxi dochází k celé řadě zkreslení měřeného signálu. Proto byl nejprve proveden výpočet s ideálním signálem (pozn.: trojúhelníkový impulz s maximem $1\,000 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$). Následně pak byly provedeny výpočty s upraveným vstupním signálem. Průběh teplotního záznamu byl nejprve upraven, tak aby simuloval max. přesnost senzoru. Teplotní záznam byl zaokrouhlován s přesností na $0,25 \text{ K}$ (pozn.: podobně jako v [44]), což odpovídá parametrům použitých termočlánků a dataloggeru. Následně byl proveden výpočet s daty, do kterých byl přidán šum $\pm 1 \text{ K}$ (pozn.: náhodný generátor čísel z intervalu -1 až $+1 \text{ K}$). Poslední výpočet spojoval oba předešlé postupy, kdy byl nejprve signál obohacen o šum $\pm 1 \text{ K}$ a následně zaokrouhlen s přesností na $0,25 \text{ K}$. Tyto výpočty byly provedeny pro všechny typy použitých senzorů.



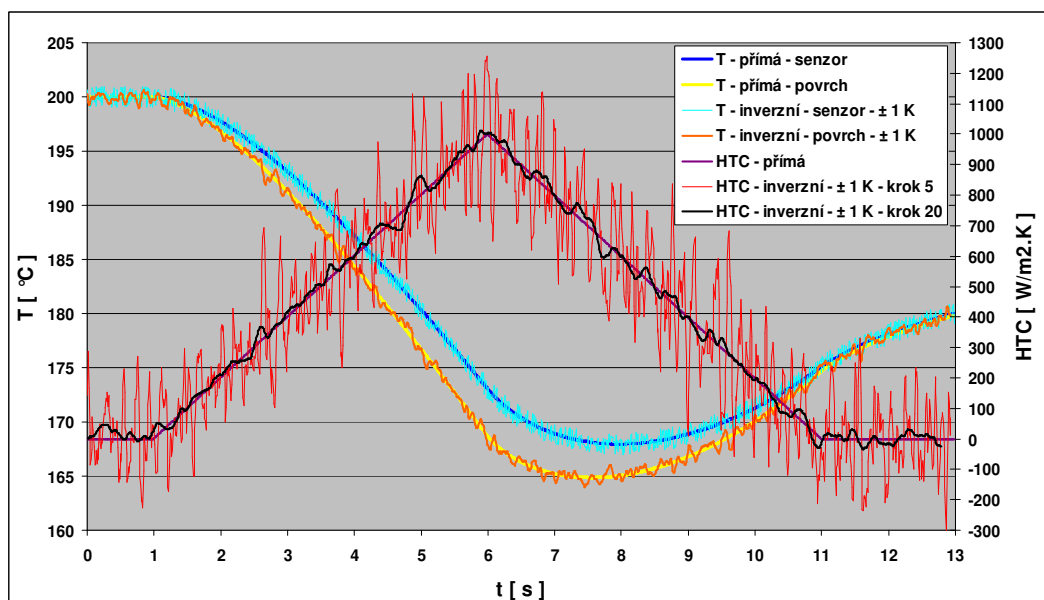
Obr.4.54. Průběhy teplot a HTC pro čidlo č.3 a trojúhelníkový pulz s maximem $1\,000 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$; bez přidání umělých chyb; pět dopředných kroků

Na obr.4.54 až 4.58. jsou uvedeny výsledky pro senzor č.3. Všechny výpočty byly pro názornost provedeny se stejným počtem dopředných kroků. Na hlavní ose je vynášena teplota v $^\circ\text{C}$ a to jak ideální (tmavě modrá), tak i upravený teplotní signál (světle modrá). Dále je pak

zobrazena skutečná a vypočtená teplota povrchu mimo senzor. Vedlejší osa zobrazuje HTC pro přímou a inverzní úlohu. Graf na obr.4.54 zobrazuje ideální případ bez zkreslení. Teplotní průběh i HTC získané inverzní úlohou je téměř shodné s úlohou přímou. Graf 4.55 obsahuje výpočty se senzorem se sníženou přesností na $\pm 0,25$ K. Teplotní záznam pro inverzní úlohu zde má schodovitý tvar a to vlivem zaokrouhlování. V důsledku toho pak inverzní HTC osciluje okolo průběhu přímé úlohy. Odchyłky jsou ale stále velmi malé.



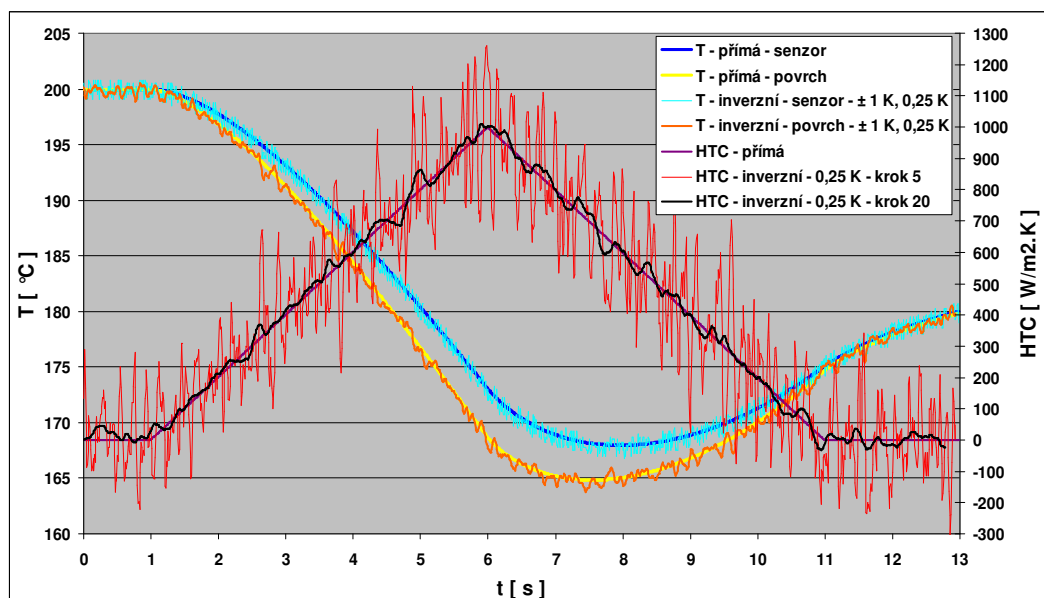
Obr.4.55. Průběhy teplot a HTC pro čidlo č.3 a trojúhelníkový pulz s maximem $1\,000\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$; zaokrouhlení $0,25\text{K}$; pět nebo dvacet dopředných kroků



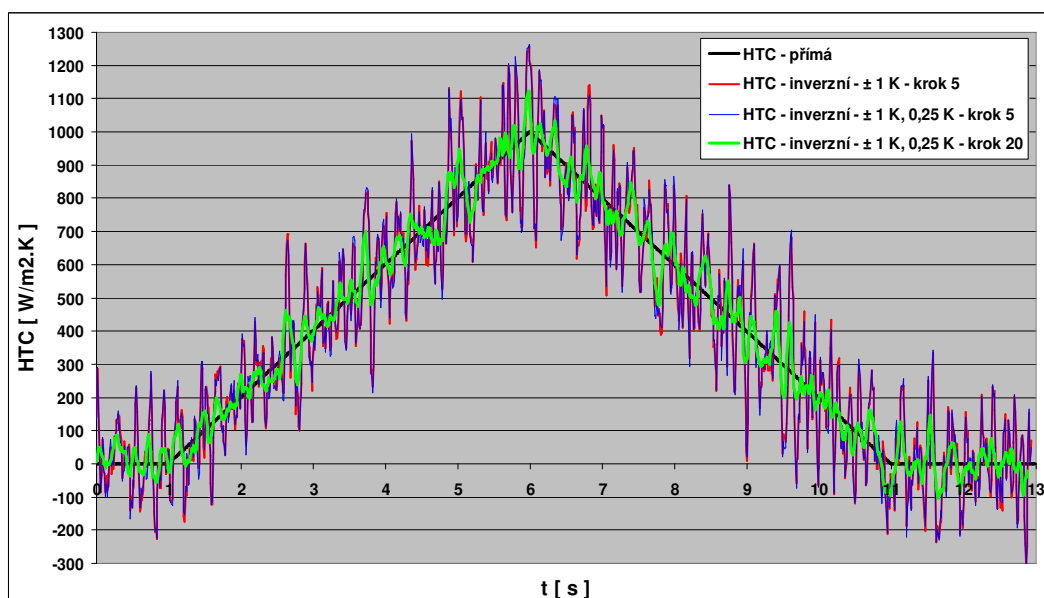
Obr.4.56. Průběhy teplot a HTC pro čidlo č.3 a trojúhelníkový pulz s maximem $1\,000\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$; přidán šum $\pm 1\text{ K}$; pět nebo dvacet dopředných kroků

Naopak přidání relativně malého šumu do vstupních dat, způsobilo velké zašumění inverzní HTC. Zejména na obr.4.56. je evidentní negativní vliv degradace vstupních teplot. Tento

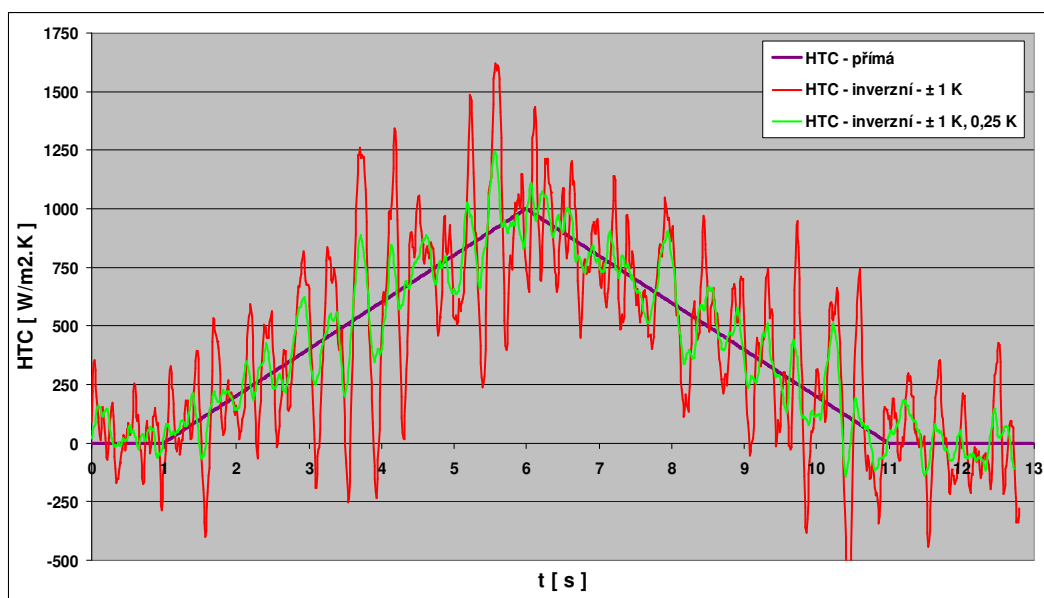
negativní vliv lze odstranit vhodným prodloužením počtu časových kroků. Zvýšením z původních pěti časových kroků (červená křivka) na dvacet kroků (černá) se HTC výrazně přiblížilo přímé úloze (fialová). Z dalších grafů vyplývá, že dodatečné zaokrouhlování záznamu se šumem již výsledný HTC nezhoršuje (viz. obr.4.58), nebo dokonce zpřesňuje (viz. obr.4.59 pro senzor č.2).



Obr.4.57. Průběhy teplot a HTC pro čidlo č.3 a trojúhelníkový pulz s maximem $1\,000\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$; přidán šum $\pm 1\text{ K}$ a zaokrouhlení $0,25\text{ K}$; pět nebo dvacet dopředných kroků

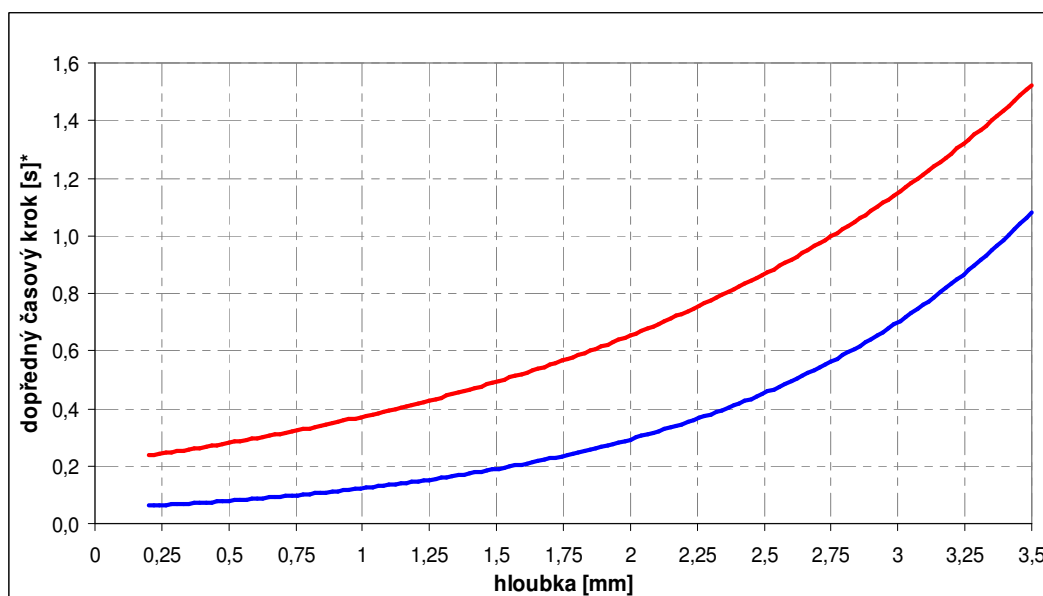


Obr.4.58. Průběhy HTC pro čidlo č.3; trojúhelníkový pulz s maximem $1\,000\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ pro šum, šum + zaokrouhlení a šum + zaokrouhlení s 5 a 20 dopřednými kroky



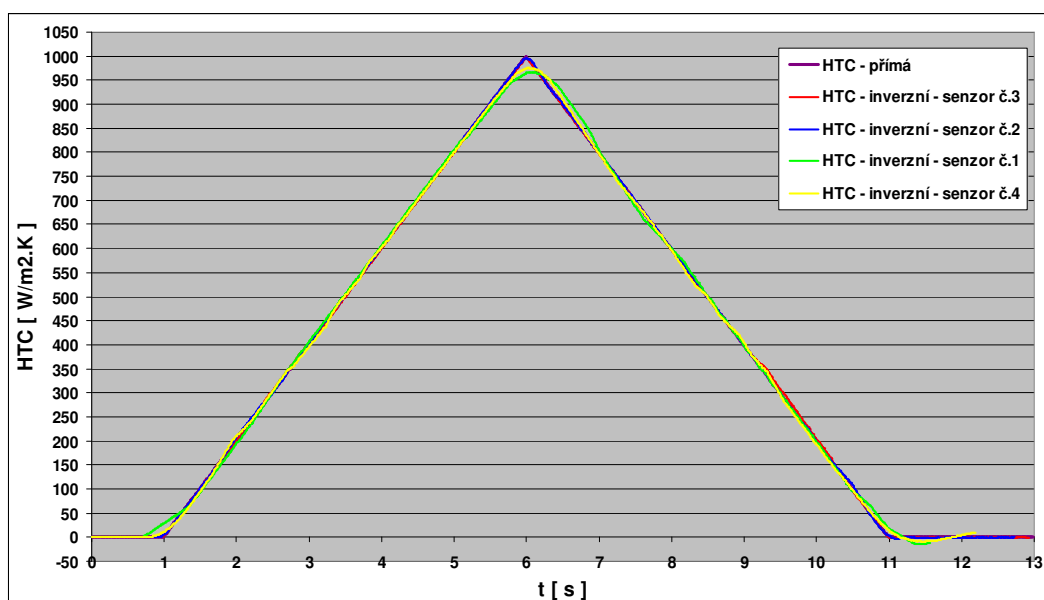
Obr.4.59. Průběhy HTC pro čidlo č.2 a trojúhelníkový pulz s maximem $1\,000\text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$ pro šum $\pm 1\text{ K}$ a šum $\pm 1\text{ K}$ + zaokrouhlení $0,25\text{ K}$

Z předešlých výsledků vyplývá, že vhodnou volbou počtu dopředných kroků lze omezit šum v datech i nepřesnost použitých senzorů. Je-li vstupní signál dokonalý lze pro odhad počtu dopředných časových kroků použít závislost z obr. 4.53. Pakliže obsahuje vstupní signál šum a nepřesnost je nutné počet kroků navýšit. Zároveň je ale nutné uvažovat i vyhlazování pulzu HTC způsobené příliš velkým počtem dopředných časových kroků. Optimální počet lze proto volíme v rozmezí křivek v grafu 4.60. Modrá křivka zobrazuje průběh počtu dopředných časových kroků opět v závislosti na hloubce senzoru pro teplotní záznam bez šumu a udává tak minimální počet dopředných časových kroků. Červená křivka pak popisuje závislost pro silně zašumělá vstupní data a slouží jako horní mez.



Obr.4.60. Závislost mezi počtem dopředných časových kroků a hloubkou senzoru pod chlazeným povrchem; modrá křivka - vstupní data bez šumu, červená křivka - silně zašumělá vstupní data

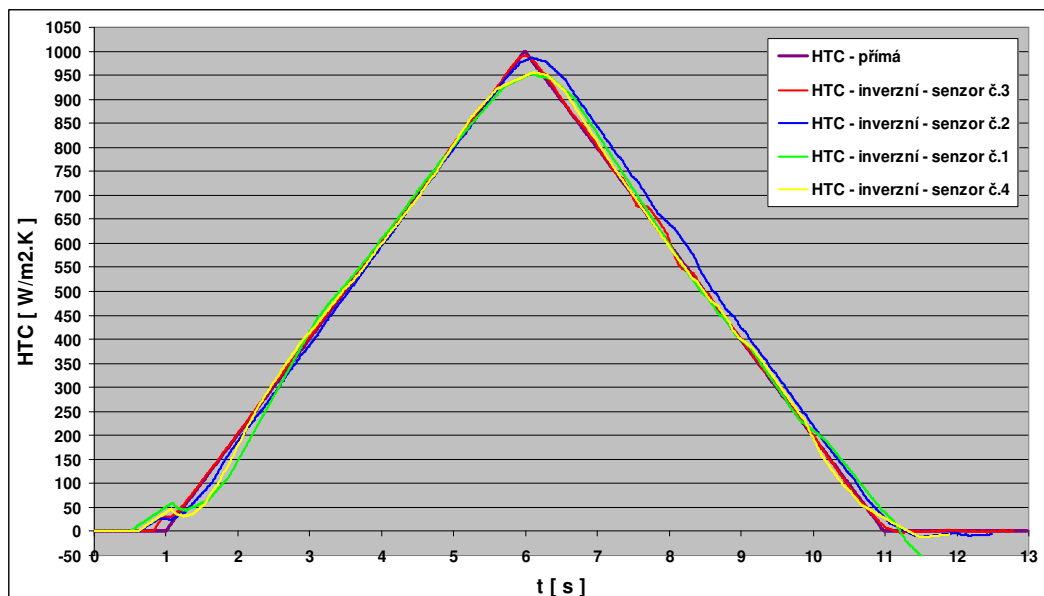
Jedním z důležitých úkolů bylo vzájemně porovnat chování jednotlivých senzorů. K tomuto účelu proběhla série výpočtů se stejným zadáním pro všechny 4 typy porovnávaných senzorů. Konkrétně se jednalo o výše zmíněný trojúhelníkový impulz s maximem $1\,000\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$. Přímou úlohou byly spočteny specifické průběhy teplot v konkrétním senzoru, které sloužily jako vstup pro inverzní úlohu. Teplotní vstupy byly použity jednak bez dodatečného zkreslení a jednak jako zkreslené. Data byla zaokrouhlena na $0,25\text{ K}$, dále pak byl přidán šum $\pm 1\text{ K}$ a nakonec kombinace obou dvou. Vzhledem k faktu, že stejný impulz HTC vyvolává s rostoucí hloubkou senzoru nižší teplotní odezvy, se předpokládal výrazně vyšší vliv dodatečného zkreslení na senzory dále od povrchu (pozn. roste poměr zkreslení vůči skutečné teplotní změně vyvolané chlazením). Nejprve byly porovnávány simulace ideálního teplotního průběhu bez dodatečného zkreslení (obr.4.61). Při vyhodnocování dlouhého pulzu s délkou 10s byly ve výsledku zjištěny jen minimální rozdíly v HTC mezi jednotlivými typy senzorů. Ty se projevovaly v místech nehladkých změn originálního HTC (pozn.: zlomy v grafu v časech 1, 6 a 11s). HTC získaný inverzní úlohou má na rozdíl od přímé úlohy hladký průběh, přičemž s rostoucí hloubkou senzoru se spočítané řešení vzdaluje původnímu řešení. Velikost vyhlazení HTC je dána počtem dopředných časových kroků. Zatímco senzor č.3 vyžadoval pouze 5 kroků a nejvíce se blížil trojúhelníkovému průběhu, pak výpočet pro senzor č.2 vyžadoval 18 kroků, pro senzor č.4 79 kroků a senzor č.1 pak 105. Kromě vyhlazování průběhu HTC měl rostoucí počet časových kroků i negativní vliv na délku výpočtu, kdy se výpočet prodlužoval ze 2 hodin (senzor č.3) až na 4 dny (č.1). Následující grafy na obr.4.62-4.64. vykreslují průběhy HTC pro simulace se zkresleným teplotním vstupem.



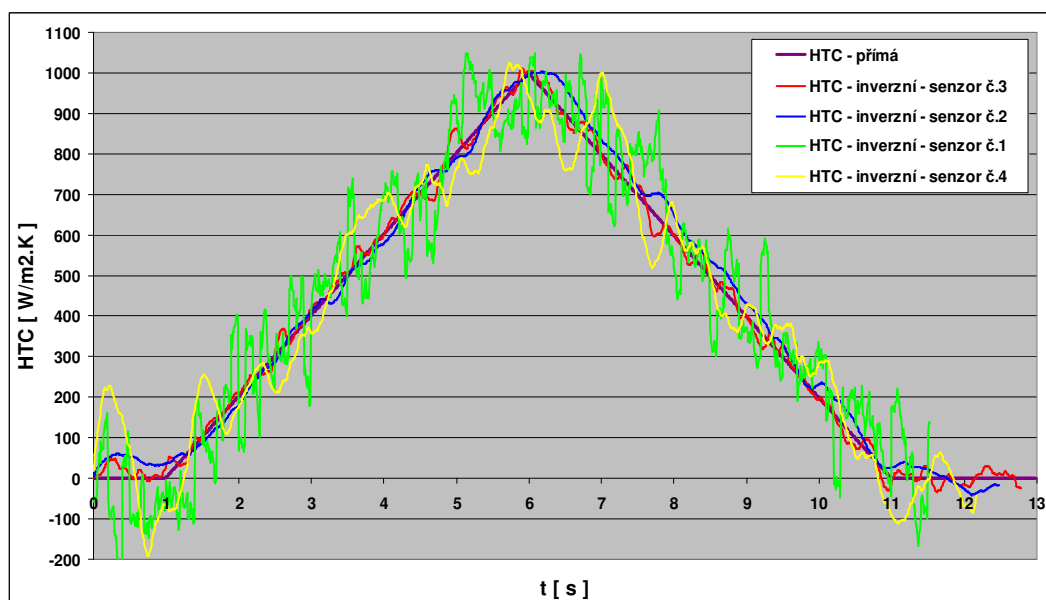
Obr.4.61. Průběhy HTC pro všechna čidla; trojúhelníkový pulz s maximem $1\,000\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$; data bez dodatečného zkreslení

Výsledky výpočtů se zaokrouhlením na $0,25\text{ K}$ (obr.4.62) ukazují mírné zhoršení přesnosti výsledného HTC oproti původnímu. Počáteční fáze všech 4 výpočtů (0-1 s) vykazuje závit HTC. Zaokrouhlení vstupních dat o $0,25\text{ K}$ směrem dolů způsobilo ve výsledku nárůst HTC, který je

přímo úměrný vzdálenosti od povrchu. Následně se vypočtený HTC přiblížily k originálním datům. Opět dochází k vyhlazování vrcholu trojúhelníkového pulzu. Negativním zjištěním byla potřeba zvýšení počtu dopředných kroků pro senzory č.3 (z 5 kroků na 20 kroků) a č.2 (z 18 na 50) oproti výpočtům bez zaokrouhlení. Důvodem byly výrazné oscilace ve výsledném HTC při použití původní délky kroku. HTC získané pomocí senzorů č.3 a č.2 byly opět nejbližší přímé úloze.

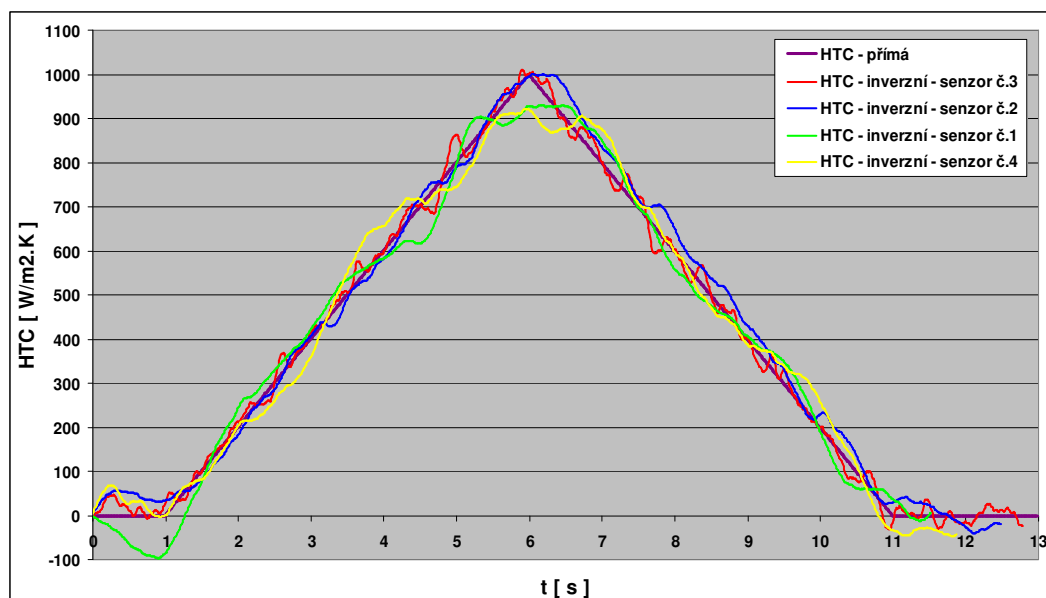


Obr.4.62. Průběhy HTC pro všechna čidla; trojúhelníkový pulz s maximem $1\,000\,W.m^{-2}.K^{-1}$; zaokrouhlení na $0,25\,K$



Obr.4.63. Průběhy HTC pro všechna čidla; trojúhelníkový pulz s maximem $1\,000\,W.m^{-2}.K^{-1}$; šum $\pm 1\,K$,

Výpočty s dodatečným šumem (obr.4.63) přinesly výrazné zneřádnění HTC (oscilace okolo původního HTC) a výrazné prodloužení výpočetního času. Jak už bylo zmíněno, do původních dat byl přidán šum. V čase, kdy byl přičten maximální šum (blíží se $+1$ nebo -1 K), docházelo k maximálním odchylkám HTC. Nepřesnosti byly dále znásobeny hloubkou senzoru pod povrchem (podrobněji kvantifikováno dále). Posledním krokem bylo zaokrouhlení teplotního záznamu se šumem, které bylo opět provedeno na $0,25$ K (obr.4.64).



Obr.4.64. Průběhy HTC pro všechna čidla; trojúhelníkový pulz s maximem $1\,000\text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$; šum ± 1 K a zaokrouhlení na $0,25$ K

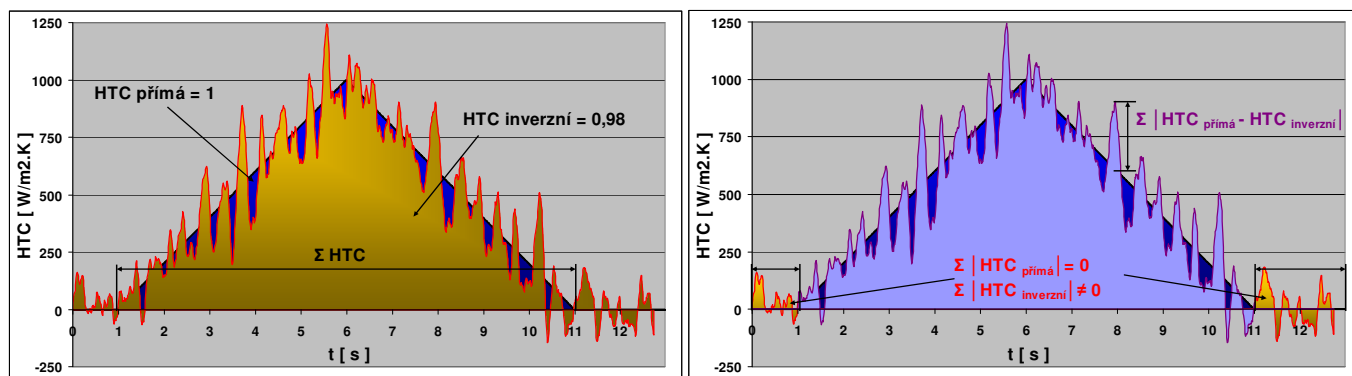
Shrnutí zjištěných vlastností všech čidel pro předešlé simulace uvádí tab.4.5. Tabulka obsahuje porovnání několika metrik pro dlouhý časový pulz. Parametr „poměr HTC“ (viz. obr.4.65. vlevo) udává poměr součtů inverzních HTC vůči ideálnímu HTC z přímé úlohy v intervalu 1 až 11s. Parametr tak popisuje poměr obsahu ploch pod grafem HTC vůči obsahu plochy trojúhelníku (pozn.: pro oba součty se uvažuje tentýž interval, ve kterém je původní HTC z přímé úlohy nenulové). Obsah plochy pod křivkou HTC je úměrný odvedené tepelné energii. Je-li hodnota poměru HTC rovna 1, pak inverzní HTC odvede stejné množství tepla jako HTC přímé úlohy. Je-li poměr větší resp. menší než 1, pak inverzní HTC odvede více resp. méně tepla. Příklad je uveden na obr.4.65. vlevo, kdy součet HTC z přímé úlohy (modrá plocha) představuje 1. Součet inverzních HTC (žlutá) představuje pouze 0,98 plochy přímé úlohy a odvede tak méně tepla.);

Dále je v tabulce uveden počet dopředných časových kroků použitých ve výpočtu pro daný typ senzoru a okrajové podmínky. Počet kroků má výrazný vliv na numerickou náročnost inverzního výpočtu (pozn.: s rostoucím počtem dopředných kroků roste i délka inverzního výpočtu) a současně počet kroků ovlivňuje vyhlazování křivky HTC.

„Suma abs. mimo Δ “ (viz. obr.4.66. vpravo) udává normovaný součet absolutních hodnot HTC mimo oblast původního trojúhelníkového pulzu (tedy v místech, kde je HTC přímé úlohy nulové). Normování součtů HTC je provedeno pomocí vzorkovací frekvence (pozn.: 100 Hz). Parametr

(pozn.: na obr.4.66. vpravo žlutá plocha pod červenou křivkou) tak udává průměrnou velikost HTC vztaženou na jeden časový krok v místech mimo původní trojúhelníkový pulz.

„Suma abs. rozdílů:“ (viz. obr.4.66. vpravo) je normovaný součet absolutních hodnot rozdílů HTC (inverzní minus přímý výpočet). Udává tedy oscilace průběhu HTC (inverzní výpočet) okolo původního trojúhelníkového pulzu HTC (okrajová podmínka z přímé úlohy). Normování součtů HTC je provedeno pomocí vzorkovací frekvence (pozn.: 100 Hz). Parametr (pozn.: na obr.4.66. vpravo světle modrá plocha pod fialovou křivkou) tak udává průměrnou velikost odchylky HTC vztaženou na jeden časový krok od původního trojúhelníkového pulzu.



Obr.4.65.(vlevo) a 4.66.(vpravo). Graf vlevo schématicky znázorňuje parametr „poměr HTC“; Vpravo schématicky znázornění parametrů „Suma abs. mimo Δ “ (červeně) a „Suma abs. rozdílů“ (fialově)

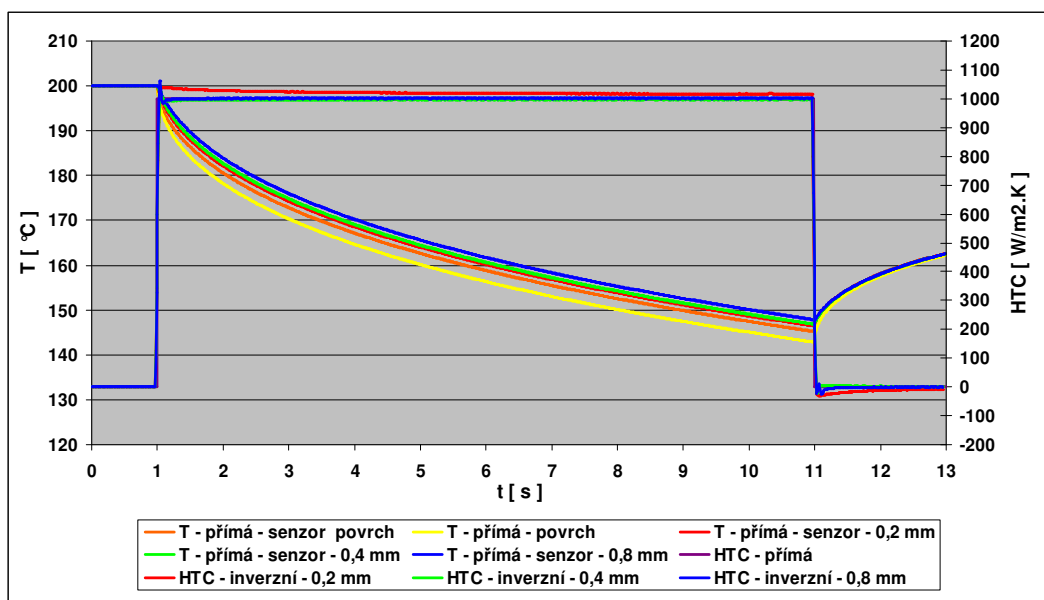
Z výpočtů vyplynulo, že poměr HTC bez šumu je velice blízký jedné. Parametr se pohybuje $\pm 0,2\%$ okolo HTC přímé úlohy (pozn.: HTC přímá = 1) a to pro všechny senzory. Přidáváním nepřesnosti do vstupních hodnot inverzního výpočtu se poměr HTC vzdaluje od 1, ale nijak dramaticky. Překvapivým zjištěním byl senzor č.2, který vykazoval největší zhoršení celkové přesnosti (viz. tab.4.5), který se odchýlil o více než 3 %. Velký rozdíl mezi senzory byl potřebný počet dopředných časových kroků. Zatímco senzory č.2 a č.3 potřebovaly malý počet kroků (pozn.: v rozmezí 5 až 50), tak senzory č.1 a č.4 vyžadovaly 79 až 150 časových kroků. Z tabulky je též patrný negativní vliv zkreslení na počet časových kroků, kdy dodatečné zkreslení v datech zvyšuje potřebný počet kroků. Zbylé dva sumační parametry („suma abs. mimo Δ “ a „suma abs. rozdílů“) jsou taktéž závislé na kvalitě vstupních dat.

Celkově nejlepším senzorem je senzor č.3, který má nejvyšší přesnost, nejnižší počet časových kroků a nejnižší sumační parametry. Senzor č.2 ze srovnání vychází jako druhý nejlepší, zatímco senzory č.1 a č.4 lze hodnotit jako nejhorší. Všechny senzory při výpočtech s dlouhým časovým pulzem dosahují velmi dobré celkové přesnosti, liší se jen ve zbylých třech parametrech.

Tab. 4.5. Porovnání senzorů dle přesnosti spočteného HTC

číslo senzoru:		1	2	3	4
hloubka senzoru [mm]:		3	1,15	0,4	3,5
Dlouhý časový pulz HTC					
trojúhelník 1000 W.m ⁻² .K ⁻¹ bez šumu	poměr HTC _{inverzní} /HTC _{přímá} [-]:	1,002	1,0019	1,0005	0,9978
	počet dopř. kroků [-]:	105	18	5	79
	suma abs. mimo Δ [W.m ⁻² .K ⁻¹ .s ⁻¹]:	7,09	0,59	0,37	3,52
	suma abs. rozdílů [W.m ⁻² .K ⁻¹ .s ⁻¹]:	6,98	1,292	1,81	4,32
trojúhelník 1000 W.m ⁻² .K ⁻¹ zaokrouhlení	poměr HTC _{inverzní} /HTC _{přímá} [-]:	1,0028	1,0219	1,0062	0,9979
	počet dopř. kroků [-]:	142	50	20	109
	suma abs. mimo Δ [W.m ⁻² .K ⁻¹ .s ⁻¹]:	56,63	7,53	13,89	27,74
	suma abs. rozdílů [W.m ⁻² .K ⁻¹ .s ⁻¹]:	23,32	18,514	3,71	14,86
trojúhelník 1000 W.m ⁻² .K ⁻¹ šum	poměr HTC _{inverzní} /HTC _{přímá} [-]:	1,0231	1,0317	1,0066	1,0064
	počet dopř. kroků [-]:	150	50	20	81
	suma abs. mimo Δ [W.m ⁻² .K ⁻¹ .s ⁻¹]:	68,99	31,16	14,98	88,54
	suma abs. rozdílů [W.m ⁻² .K ⁻¹ .s ⁻¹]:	79,22	26,43	15,8	64,33
trojúhelník 1000 W.m ⁻² .K ⁻¹ šumu + zaokrouhlení	poměr HTC _{inverzní} /HTC _{přímá} [-]:	0,9947	1,0312	1,0071	1,0034
	počet dopř. kroků [-]:	146	50	20	111
	suma abs. mimo Δ [W.m ⁻² .K ⁻¹ .s ⁻¹]:	42,08	31,02	14,69	34,05
	suma abs. rozdílů [W.m ⁻² .K ⁻¹ .s ⁻¹]:	33,75	26,29	16,12	33,85

Kromě vzájemného porovnávání jednotlivých senzorů byl v této práci analyzován vliv geometrie senzorů. Konkrétně byl zkoumán vliv hloubky zabudování termočlásku v každém jednotlivém typu senzoru. K tomuto typu výpočtů byl zvolen obdélníkový pulz HTC s trváním 10s a maximem 1 000 W.m⁻².K⁻¹. Důvodem byla snaha zjistit reakci jednotlivých typů čidel v různé konfiguraci na skokové změny a zjistit dobu potřebnou k ustálení HTC. Pro senzor č.3 to konkrétně znamenalo, že kromě obvyklé v praxi používané hloubky 0,4 mm pod povrchem byly navíc dodatečně simulovány hloubky 0,2 a 0,8 mm (pozn.: výsledky na obr.4.67). Všechny tři výpočty byly provedeny se stejným počtem časových kroků (pozn.: 3 dopředné kroky). Dále byly provedeny výpočty pro 2 a 5 dopředných kroků. Ve všech případech dochází k deformaci HTC oproti originální okrajové podmínce obdélníkového tvaru. HTC je nenulové již několik časových okamžiků před skokovou změnou, což je dáno zejména počtem dopředných kroků a hloubkou senzoru. Dále dochází k překmitu maxima původního HTC s následnou konvergencí k hodnotě 1000 W.m⁻².K⁻¹. Nejvyšší překmit byl zaznamenán u nejhlubšího senzoru. Podobné chování se vyskytuje i v okamžiku skokové změny z 1000 na 0 W.m⁻².K⁻¹ v čase 11s, ale směrem do záporných hodnot. Celkové porovnání pro tento typ senzoru a různé hloubky zabudování termočlásku je uvedeno v tab.4.6, která obsahuje výše popsané charakteristiky jako je „poměr HTC“, „suma abs. rozdílů“. Parametr „doba ustálení“ navíc udává dobu za, kterou se inverzní výpočet přiblíží k přímé úloze na rozdíl menší než 3%.



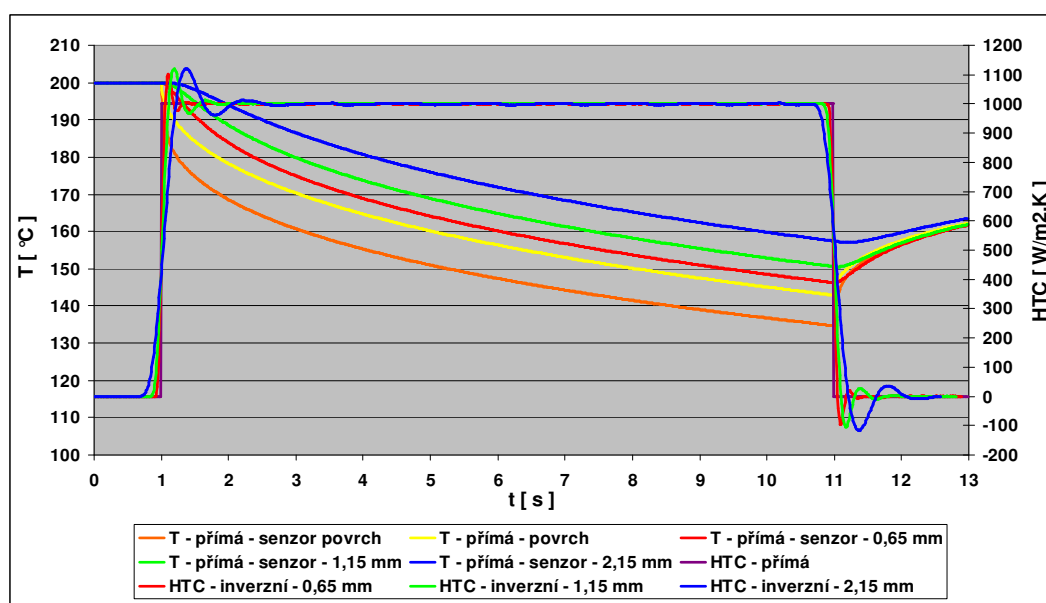
Obr.4.67. Průběhy teplot a HTC pro čidlo č.3 v závislosti na hloubce; termočlánek v 0,2, 0,4 a 0,8 mm pod povrchem

Z tabulky 4.6 vyplývá, že případná změna geometrie čidla by nepřinesla zlepšení výsledného HTC. A to ani v případě přiblížení termočlátku na 0,2 mm k povrchu (pozn.: technicky velmi špatně proveditelné). Poměr HTC se pro všechny konfigurace a počty časových kroků pohybuje do 2 % okolo HTC přímé úlohy. Počet kroků má vliv i na dobu ustálení. Malý počet kroků (pozn.: 2 dopředné časové kroky) totiž způsobuje oscilace okolo hodnoty $1000 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$ a tudíž ustálení je dosaženo později. Na druhou stranu ani posunutí termočlátku dále od povrchu nepřineslo žádné zhoršení schopností senzoru. S použitím 5 dopředných časových kroků byly výsledky srovnatelné s původním senzorem v hloubce 0,4 mm pod povrchem.

Tab. 4.6. Porovnání přesnosti HTC pro senzor 3

Číslo senzoru:		3	3	3
hloubka senzoru [mm]:		0,2	0,4	0,8
Dlouhý časový pulz HTC				
1000 $\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$ 2 dopředné kroky	poměr $\text{HTC}_{\text{inverzní}}/\text{HTC}_{\text{přímá}} [-]$:	1,0128	1,0086	---
	suma abs. mimo $\Delta [\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}.\text{s}^{-1}]$:	7,12	6,7	---
	suma abs. rozdílů $[\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}.\text{s}^{-1}]$:	14,40	10,09	---
	doba ustálení [s]:	1,01	1,86	---
1000 $\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$ 3 dopředné kroky	poměr $\text{HTC}_{\text{inverzní}}/\text{HTC}_{\text{přímá}} [-]$:	1,0191	0,9964	1,0005
	suma abs. mimo $\Delta [\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}.\text{s}^{-1}]$:	12,76	5,37	5,62
	suma abs. rozdílů $[\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}.\text{s}^{-1}]$:	19,78	4,15	3,38
	doba ustálení [s]:	0,82	0,03	0,06
1000 $\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$ 5 dopředných kroků	poměr $\text{HTC}_{\text{inverzní}}/\text{HTC}_{\text{přímá}} [-]$:	1,0172	0,9969	---
	suma abs. mimo $\Delta [\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}.\text{s}^{-1}]$:	15,72	7,64	---
	suma abs. rozdílů $[\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}.\text{s}^{-1}]$:	20,01	4,4	---
	doba ustálení [s]:	0,64	0,09	---

Senzor č.2 byl analyzován pro hloubku termočlásku 0,65; 1,15 (pozn.: standardní geometrie) a 2,15 mm s počtem časových kroků 9, 18 a 40 (výsledky na obr.4.68 a v tab.4.7). Opět byl použit stejný obdélníkový impuls o maximu $1000 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$ a opět byl pozorován podobný průběh jako u předešlého senzoru (tzn.: předstih nenulových hodnot HTC, překmit na maximální hodnoty a konvergence). Z výsledků (viz tab.4.9) vyplývá, že by případné přiblížení termočlásku blíže k povrchu (pozn.: z 1,15mm na 0,65 mm) mohlo přinést zlepšení parametrů tohoto senzoru. Počet časových kroků se snížil na polovinu, což snižuje numerickou náročnost, a současně se zlepšily sumační parametry (tzn. menší odchylky od ideálního průběhu HTC). Posun termočlásku dále od povrchu (pozn.: na 2,15 mm) vedl k mírnému zhoršení zejména sumačních parametrů a doby ustálení. Přesnost všech tří geometrií se pohybuje do 1 % od HTC přímé úlohy.



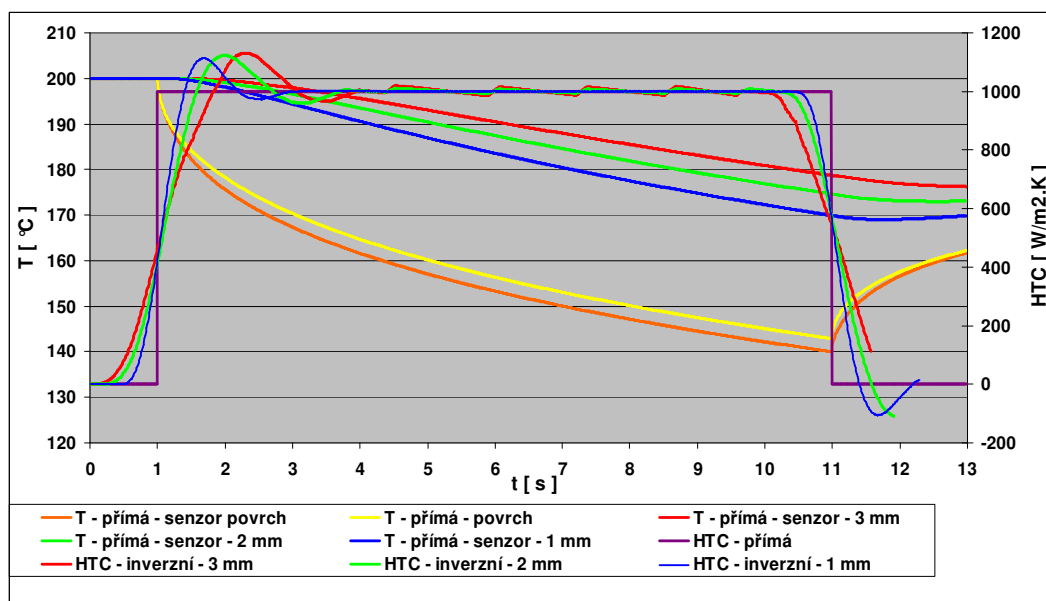
Obr.4.68. Průběhy teplot a HTC pro čidlo č.2 v závislosti na hloubce; termočlánek v 0,65, 1,15 a 2,15 mm pod povrchem

Tab. 4.7. Porovnání přesnosti HTC pro senzor 2

Číslo senzoru:		2	2	2
hloubka senzoru [mm]:		0,65	1,15	2,15
Dlouhý časový pulz HTC				
obdélník $1000 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$ 10s	poměr $\text{HTC}_{\text{inverzní}}/\text{HTC}_{\text{přímá}} [-]$:	0,9977	0,9972	0,9922
	počet dopř. kroků [-]:	9	18	40
	suma abs. mimo $\Delta [\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}.\text{s}^{-1}]$:	12,83	23,99	53,08
	suma abs. rozdílů $[\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}.\text{s}^{-1}]$:	6,25	11,68	23,4
	doba ustálení [s]:	0,17	0,44	0,90

Senzor č.1 byl propočítáván s nastavením hloubky na 1, 2 a 3 (standardní geometrie) mm pod povrchem a časovým krokem 70, 107 a 152 (výsledky viz. obr.4.67 a v tab.4.8). Výpočty s tímto senzorem byly numericky nejnáročnější a trvaly nejdéle (pozn.: nepřetržitě 7 až 12 dní). Tento fakt je již patrný z počtu časových kroků. Délka výpočtu se prodlužovala v závislosti na rostoucí vzdálenosti termočlásku od chlazeného povrchu. Poměr HTC se pohyboval v rozmezí od 0,97 až

do 0,99, přičemž nejbližší přímé úloze byl senzor v hloubce 1 mm (Poměr HTC = 0,9871). Naopak nejhoršího poměru HTC dosáhl senzor v hloubce 3 mm (pozn.: standardní hloubka, poměr HTC = 0,9724). Sumační parametry (tab.4.8) jsou v tomto případě závislé na hloubce senzoru. Senzor v hloubce 3 mm vykazuje dvakrát větší hodnoty, což je i patrné z grafu 4.69. (červená versus modrá křivka HTC). Podobně i doba nutná k ustálení se více než zdvojnásobila (z 1,08s na 2,60s, taktéž patrné z grafu 4.69). Celkově lze říci, že případná změna geometrie tohoto čidla (pozn.: přiblížení blíže k povrchu např. na 1 mm) může přinést zlepšení přesnosti měření, zmenšení šumu a zkrácení délky samotného inverzního výpočtu.



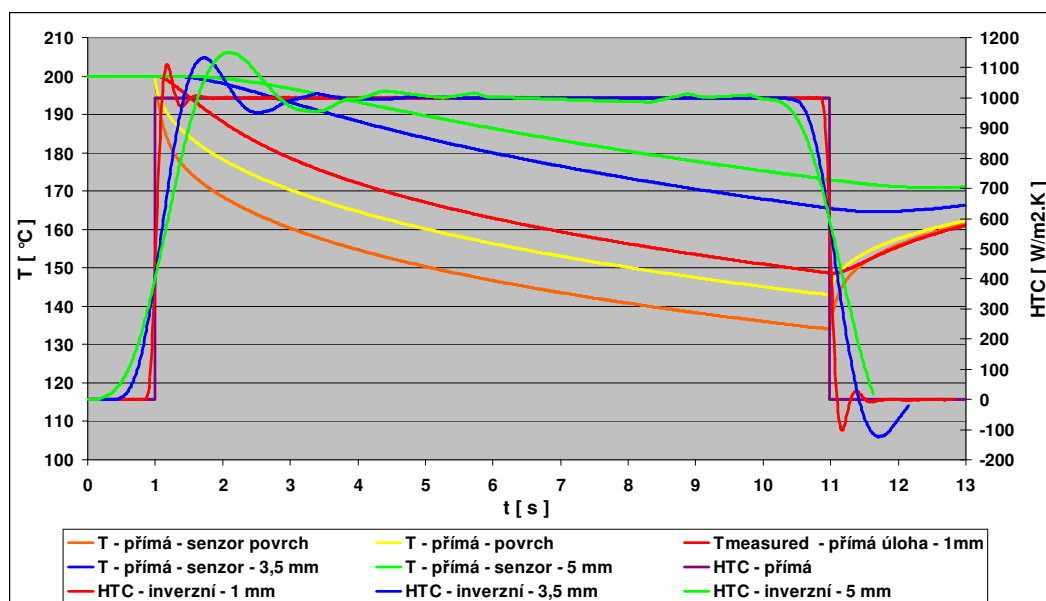
Obr.4.69. Průběhy teplot a HTC pro čidlo č.1 v závislosti na hloubce; termočlánek v 1, 2 a 3 mm pod povrchem

Tab. 4.8. Porovnání přesnosti HTC pro senzor 1

Číslo senzoru:		1	1	1
hloubka senzoru [mm]:		1	2	3
Dlouhý časový pulz HTC				
obdélník 1000 W.m ⁻² .K ⁻¹ 10s	poměr HTC _{inverzní} /HTC _{přímá} [-]:	0,9871	0,9811	0,9724
	počet dopř. kroků [-]:	70	107	152
	suma abs. mimo Δ [W.m ⁻² .K ⁻¹ .s ⁻¹]:	97,87	142,91	220,89
	suma abs. rozdílů [W.m ⁻² .K ⁻¹ .s ⁻¹]:	38,48	55,80	73,82
	doba ustálení [s]:	1,08	2,36	2,60

Poslední senzor č.4 (pozn.: tento senzor není zatím standardně využíván v LPTaP) byl simulován v hloubkách 1, 3,5 (použit ve vzorku A) a 5 mm s časový krokem 16, 83 a 135 (výsledky na obr.4.70 a v tab.4.9). Tento senzor měl i ve velkých hloubkách parametr poměru HTC blízko jedné (0,9804 až 0,997), což je překvapivé v porovnání s předchozím senzorem č.1. Model současně vyžadoval i nižší počty dopředných kroků, což se příznivě projevilo na délce výpočtu (pozn.: stále však výrazně delší výpočty než u senzorů č. 2 a 3). Sumační parametry pro

podobné hloubky od povrchu jsou taktéž výrazně lepší než u senzoru č.1. Senzor se tak spíše blíží výsledkům senzoru č.2.



Obr.4.70. Průběhy teplot a HTC pro čidlo č.4 v závislosti na hloubce; termočlánek v 1, 3,5 a 5 mm pod povrchem

Tab. 4.9. Porovnání přesnosti HTC pro senzor 4

Číslo senzoru:		4	4	4
hloubka senzoru [mm]:		1	3,5	5
Dlouhý časový pulz HTC				
obdélník 1000 W.m ⁻² .K ⁻¹ 10s	poměr $HTC_{inverzní}/HTC_{přímá}$ [-]:	0,997	0,9845	0,9804
	počet dopř. kroků [-]:	16	83	135
	suma abs. mimo Δ [W.m ⁻² .K ⁻¹ .s ⁻¹]:	22,18	113,87	176,66
	suma abs. rozdílů [W.m ⁻² .K ⁻¹ .s ⁻¹]:	10,33	44,64	66,39
	doba ustálení [s]:	0,30	1,80	0,90

Z vzájemného porovnání jednotlivých senzorů v různých hloubkách lze vyvodit jejich chování. Poměr HTC všech čidel se pohybuje v intervalu 0,998 až 1,02 a jsou velmi blízko HTC přímé úlohy (pozn.: poměr $HTC_{přímé\ úlohy} = 1$). Ze simulací vyplynul negativní vliv hloubky senzoru pod povrchem. Nejlepšího poměru HTC dosahuje senzor č.2 a č.3, nejhorší pak senzor č.1. Velkým rozdílem mezi různými čidly je počet dopředných časových kroků. Inverzní výpočty s nejpřesnějšími senzory č.2 a č.3 vyžadovali mnohem méně časových kroků než senzor č.1 (a to i v přibližně stejné hloubce). Tím roste i numerická náročnost výpočtu (pozn.: doba nutná k výpočtu). Senzor č.4 se přesností, počtem časových kroků i délkou výpočtu pohyboval mezi oběma skupinami. Největší rozdíly mezi jednotlivými senzory jsou u sumačních parametrů (vyjadřují např. míru oscilací) a v době ustálení. Porovnání všech těchto parametrů a celkové vyhodnocení senzorů je uvedeno v tab.4.10. Nejlepšího hodnocení při výpočtech s dlouhým impulzem HTC dosáhl senzor č.3 a to ve všech kritériích. Senzor č.2 získal druhý nejlepší výsledek. Senzor č.1 se naopak jevil jako nejhorší ze všech. U tohoto senzoru by bylo možné dosáhnout lepších výsledků pokud by

byl termočlánek blíže povrchu (např. 1 mm, viz tab.4.8. a graf 4.69). Senzor č.4, který se v současnosti v LPTaP nepoužívá, získal třetí nejlepší hodnocení. Všechny tyto senzory jsou dostatečně přesné k měření dlouhých pulzů HTC.

Tab. 4.10. Celkové porovnání senzorů pro výpočty s dlouhým pulzem HTC

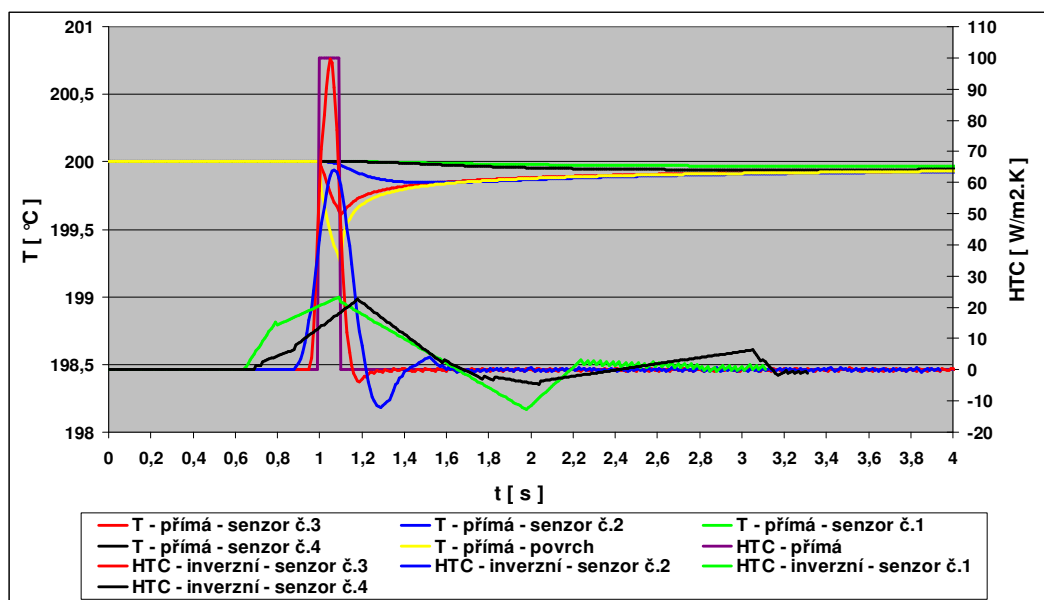
Senzor	Poměr HTC	Počet kroků	suma abs. mimo Δ	suma abs. rozdílů	dobu ustálení	Celkové hodnocení
č.1	++	-	--	--	--	- (slabá)
č.2	+++	++	++	++	++	++ (velmi dobrá)
č.3	+++	+++	+++	+++	+++	+++ (výborná)
č.4	++	+	-	+	+	+ (dobrá)

Pozn.: +++ výborná, ++ velmi dobrá, + dobrá, - slabá, -- velmi slabá, --- nedostatečná

Krátký časový pulz

Chlazení během krátkého časového pulzu probíhalo po dobu 0,1s při vzorkovací frekvenci 100 Hz. Z toho plyne, že délka celého pulzu činila pouze 10 časových kroků. Simulace byly prováděny na obdélníkovém pulzu s maximem 100, 1 000 a 10 000 W.m⁻².K⁻¹ a výpočty běžely s různým počtem dopředných kroků (pozn.: dle použitého čidla). Časová diskretizace byla pro všechny výpočty stejná (pozn.: odpovídala vzorkovací frekvenci 100 Hz). Krátké pulzy byly aplikovány na všechny čtyři typy senzorů a přestavovaly druhou polovinu provedených simulací.

Grafy na obr.4.71-4.73 ukazují průběhy teplot a HTC pro všechny 4 typy senzorů. V tabulkách Tab.4.11-4.13 jsou pak následně uvedeny hodnotící parametry. Vzhledem k vysoké dynamice simulovaného děje je nutné zmínit délku použitých dopředných kroků ve výpočtu. Výpočet pro senzor č.3 proběhl s 5-ti dopřednými kroky, č.2 vyžadoval 16 – 17 kroků, č.4 pak 79 a senzor č.1 dokonce 99 – 105 kroků. Již jen ze samotného počtu potřebných kroků, je patrná omezená schopnost senzorů č.4 a č.1 zachytit takto rychlé děje. Tyto senzory celkově mají problém zachytit geometrii pulzu, tzn. výšku pulzu jeho délku. Proto byl pro krátké pulzy zaveden nový porovnávací parametr – „Suma HTC“, který vyjadřuje součet HTC inverzní úlohy přes celý časový interval. Suma HTC je úměrná celkovému odvedenému teplu pro celý interval výpočtu (pozn.: 0 až 4s). Cílem bylo zjistit, jak modely jednotlivých senzorů určí celkové odvedené teplo (např. senzor, který nedostatečně rychle reaguje na změny HTC, může správně určit celkovou energetickou bilanci přenosu tepla).



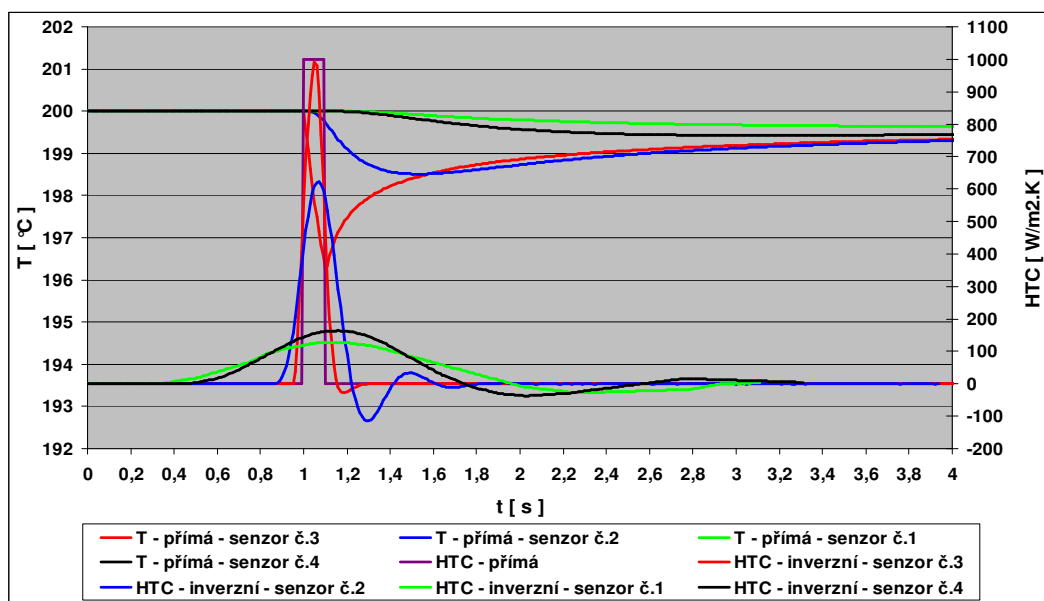
Obr.4.71. Průběhy teplot a HTC pro všechna 4 čidla; obdélníkový pulz v délce 0,1s a 100 $\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$

Tab. 4.11. Porovnání přesnosti HTC pro impuls 100 $\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$

Číslo senzoru:		1	2	3	4
hloubka senzoru [mm]:		3	1,15	0,4	3,5
Dlouhý časový pulz HTC					
obdélník 100 $\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$ 0,1s	poměr $\text{HTC}_{\text{inverzní}}/\text{HTC}_{\text{přímá}} [-]$:	0,2194	0,5718	0,8226	0,1576
	počet dopř. kroků [-]:	99	16	5	79
	suma abs. mimo $\Delta [\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}.\text{s}^{-1}]$:	5,20	2,18	0,9	4,13
	suma abs. rozdílů $[\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}.\text{s}^{-1}]$:	7,72	3,13	1,2	6,66
	doba ustálení [s]:	ne	ne	0,05	ne
	suma HTC $[\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}.\text{s}]$:	1 073,3	1 003,8	991,2	1 086

Graf 4.71 a tab.4.11. obsahuje výsledky pro výpočty s pulzem HTC o maximu 100 $\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$. Celková přesnost senzorů se při těchto výpočtech pohybovala v rozsahu od 15,7 do 82,3 %, tzn. pro děj v trvání 0,1s byly schopny zaznamenat pouze 15,7 až 82,3 % velikosti impulsu HTC v daném časovém intervalu. Mezi jednotlivými senzory byly velmi výrazné rozdíly. Zatímco nejlepší senzor č.3 byl schopen zachytit 82,26 % (pozn.: porovnatelné s výsledky pro dlouhý pulz), tak senzory č.1 zachytili pouze 21,94 % a č.4 jen 15,76 %. Přestože některé senzory nedokáží zachytit pulz HTC v krátkém okamžiku se celková energetická bilance („suma HTC“) velmi blíží přímé úloze (pozn.: 1 000 $\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}.\text{s}$). Všechny senzory tak splňují zákon zachování energie. Velký rozdíl mezi senzory je opět v počtu časových kroků. Nejrychleji reagující senzor č.3 vyžadoval pouze 5 dopředných časových kroků, zatímco senzor č.1 potřeboval 99 kroků. Sumační parametry vykazují taktéž výrazné rozdíly mezi senzory a to v závislosti na hloubce od povrchu. Nejbližší senzor č.3 dosáhl nejmenších hodnot, současně byl jediným senzorem, který se ustálil (tzn. $\text{HTC}_{\text{přímá}} - \text{HTC}_{\text{inverzní}} < 3 \%$). Ustálení nastalo po 0,05 s, což je přesně s polovinou pulzu. Zbylé senzory se HTC přímé úlohy nepřiblížili na méně než 3 %.

Výpočty s pulzem HTC $1\,000\text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$ jsou shrnuty v tab.4.12. a v grafu 4.72. Tento pulz HTC je při stejné době trvání (pozn.: 0,1s) oproti předchozímu desetkrát vyšší. Přesto se však celková přesnost (jen mírně poklesla) a počet časových kroků (beze změny) příliš nezměnil. Výjimkou je pouze senzor č.1, u kterého došlo k výraznějšímu poklesu přesnosti na 12,34 %. Dalším rozdílem oproti pulzu $100\text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$ je výrazně hladší průběh HTC pro senzory č.1 a č.4 (viz. obr.4.71. a 4.72). Toto se příznivě projevilo i na celkové energetické bilanci, kdy suma HTC se pro všechny senzory ještě více přiblížila hodnotě přímé úlohy (pozn.: přímá úloha $10\,000\text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}.\text{s}$, inverzní úlohy 9 601 až $10\,016\text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}.\text{s}$).



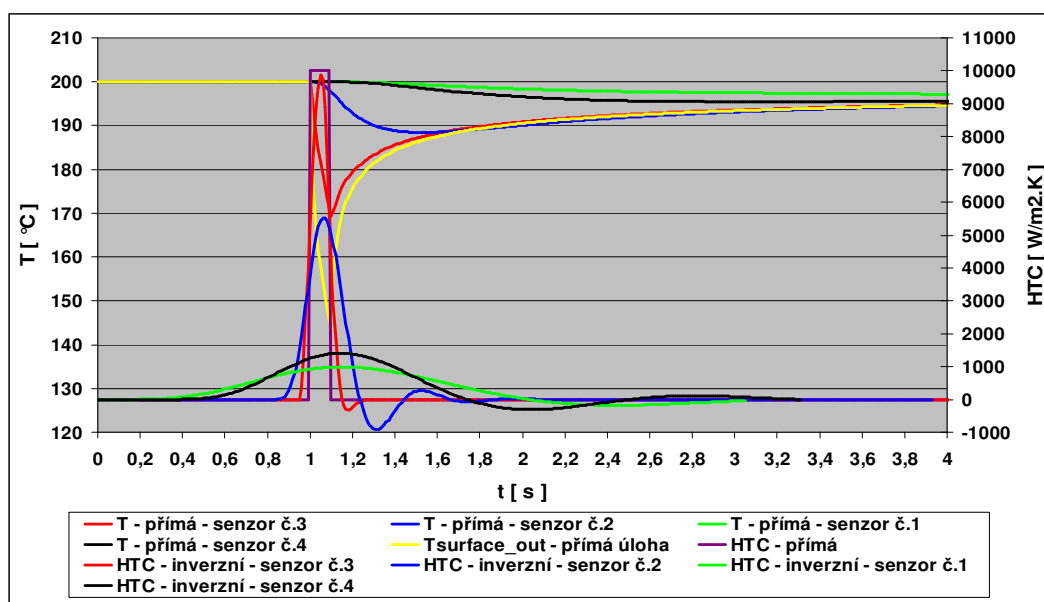
Obr.4.72. Průběhy teplot a HTC pro všechna 4 čidla; obdélníkový pulz v délce 0,1s a $1\,000\text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$

Tab. 4.12. Porovnání přesnosti HTC pro impulz $1\,000\text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$

Číslo senzoru:		1	2	3	4
hloubka senzoru [mm]:		3	1,15	0,4	3,5
Dlouhý časový pulz HTC					
obdélník $1\,000\text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$ 0,1s	poměr $\text{HTC}_{\text{inverzní}}/\text{HTC}_{\text{přímá}} [-]$:	0,1234	0,5618	0,8134	0,1534
	počet dopř. kroků [-]:	99	16	5	79
	suma abs. mimo $\Delta [\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}.\text{s}^{-1}]$:	39,82	19,14	5,70	37,8
	suma abs. rozdílů $[\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}.\text{s}^{-1}]$:	68,94	30,55	10,41	64,17
	doba ustálení [s]:	ne	ne	0,06	ne
	suma HTC $[\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}.\text{s}]$:	9 601	9 968	9 956	10 019

Posledními výpočty bez zkreslení v datech byly simulace s pulzem o maximu $10\,000\text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$ (výsledky viz. tab.4.13. a obr 4.73). Celková přesnost opět mírně poklesla, ale počet dopředných časových kroků zůstal stejný. Křivky HTC jsou taktéž výrazně hladší v porovnání s pulzem $100\text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$. Sumační parametry vykazují závislost na velikosti pulzu – s rostoucím maximem pulzu rostou i oba parametry. Roste tedy průměrná odchylka od HTC přímé úlohy („suma abs. rozdílů“) a stejně i rostou i součty HTC v intervalu, kde je přímá úloha nulová („suma abs. mimo Δ “).

Jediným senzorem, u kterého došlo k ustálení je senzor č.3, který celkově vykazoval nejlepší výsledky. Druhý v pořadí dle sledovaných parametrů je senzor č.2. Zbylé dva senzory (tj. č.1 a č.4) vykazovaly velice špatné výsledky a to zejména celková přesnost byla velice nízká.



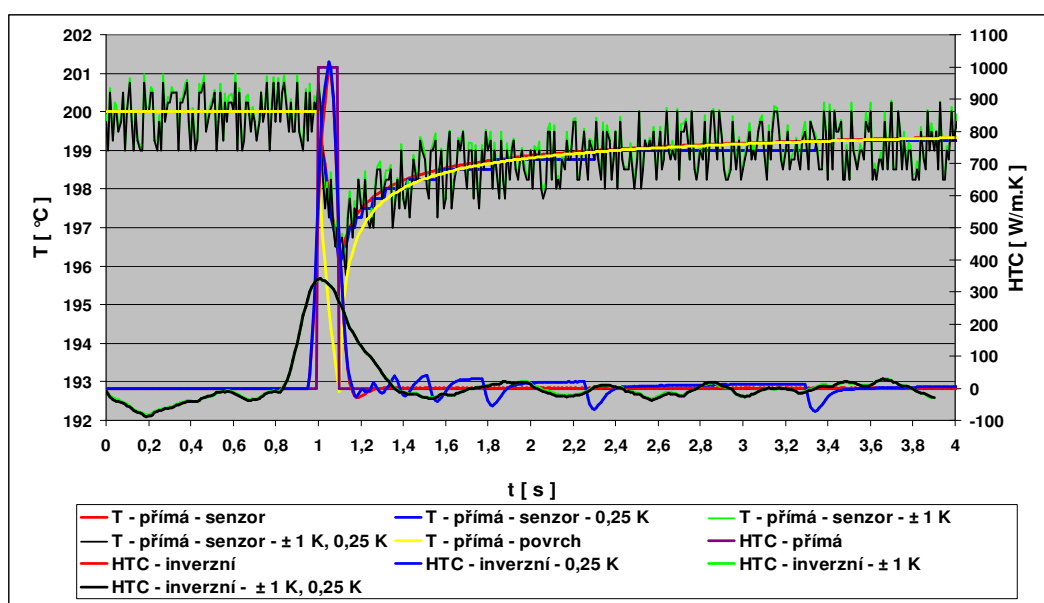
Obr.4.73. Průběhy teplot a HTC pro všechna 4 čidla; obdélníkový pulz v délce 0,1s a 10 000 $W.m^{-2}.K^{-1}$

Tab. 4.13. Porovnání přesnosti HTC pro impuls 10 000 $W.m^{-2}.K^{-1}$

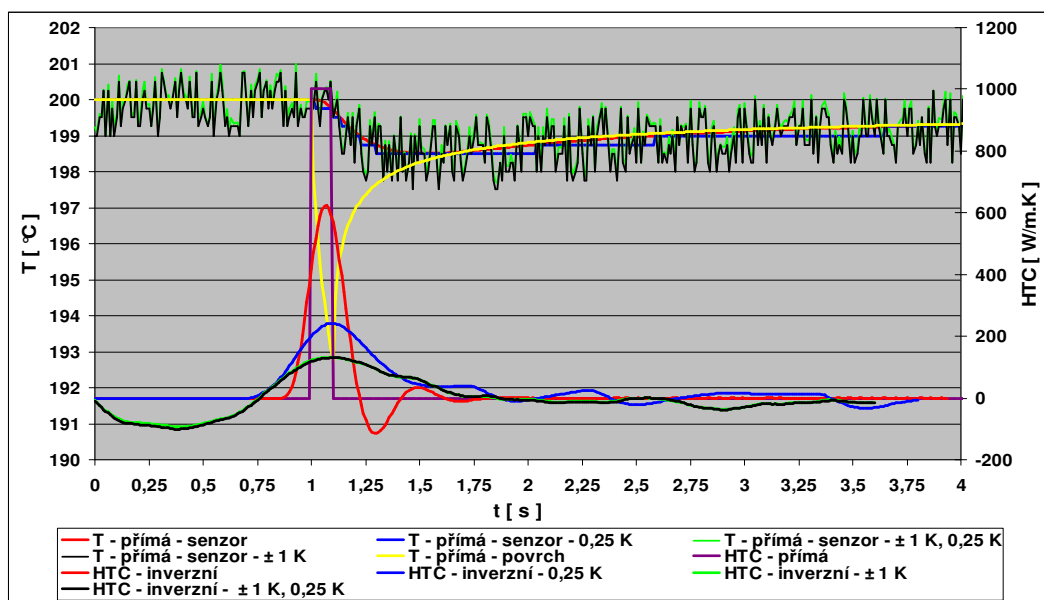
Číslo senzoru:		1	2	3	4
hloubka senzoru [mm]:		3	1,15	0,4	3,5
Dlouhý časový pulz HTC					
obdélník 10 000 $W.m^{-2}.K^{-1}$ 0,1s	poměr $HTC_{inverzní}/HTC_{přímá}$ [-]:	0,952	0,5013	0,8068	0,1330
	počet dopř. kroků [-]:	99	16	5	79
	suma abs. mimo Δ [$W.m^{-2}.K^{-1}.s^{-1}$]:	320,4	189,8	68,1	324,04
	suma abs. rozdílů [$W.m^{-2}.K^{-1}.s^{-1}$]:	617,77	305,91	102,05	585,91
	dobu ustálení [s]:	ne	ne	0,06	ne
	suma HTC [$W.m^{-2}.K^{-1}.s$]:	80665	92472	97093	85381

Podobně jako u simulací dlouhého pulzu byl i pro krátký pulz HTC zkoumán vliv nepřesností ve vstupních datech. K výpočtům byl použit impuls o výšce 1 000 $W.m^{-2}.K^{-1}$ s dobou trvání 0,1s. Zkreslení bylo aplikováno na teplotní záznam získaný přímou úlohou. Podobně jako v předchozích případech byla data nejprve zaokrouhlena na $\pm 0,25$ K, což odpovídá obvyklé přesnosti běžného termočlánku. Následně pak byl přidán do výchozích dat šum s normálním rozdělením (pozn.: ± 1 K okolo ideální signálu). Poslední sada výpočtů kombinovala obě předchozí varianty, a to nejdříve aplikací šumu a následně zaokrouhlením. Výpočty byly provedeny pro všechny čtyři zkoumané senzory a výsledky jsou uvedeny v následujících grafech (viz. obr.4.74 pro senzor č. 3, obr.4.75 pro č.2, obr.4.76 pro č.1 a obr.4.77 pro č.4). V tabulce tab.4.14. jsou pak následně shrnuty hodnotící parametry.

Nejprve byly provedeny výpočty se senzorem č.3, který se doposud jevil jako nejlepší ze všech senzorů. Na obr.4.74. jsou zobrazeny průběhy teplotního záznamu a HTC. Červená křivka HTC, která odpovídá nezkruslenému teplotnímu signálu, se zde téměř v celém intervalu překrývá s modrou křivkou HTC (pozn.: zaokrouhlení teplotního záznamu na $\pm 0,25$ K). Zkruslení vstupního signálu bylo v tomto případě překvapivě projevilo zvýšením celkové přesnosti o 3,3% a to při stejném počtu časových kroků. Negativní vliv zaokrouhlování se projevil na parametru „suma HTC“ (odpovídá celkové energetické bilanci přestupu tepla), kdy model se zaokrouhlením celkově vykazuje vyšší hodnotu ($11\,100\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{s}$ oproti $10\,000\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{s}$ pro přímou úlohu). Přidaný šum v datech měl naopak významný vliv na průběh a velikost křivek HTC (zelená křivka – šum ± 1 , černá – šum ± 1 K a zaokrouhlení $\pm 0,25$ K). Obě tyto dvě křivky jsou si velmi blízké a často se překrývají, z čehož plyne, že zaokrouhlování zašumělých dat již výrazněji nezhoršuje inverzní výpočet HTC. Oba tyto případy však vykazují výrazně horší sumační hodnotící parametry (viz. tab.4.14). Např. suma HTC poklesla z hodnoty $9956\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{s}$ na $4672\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{s}$.

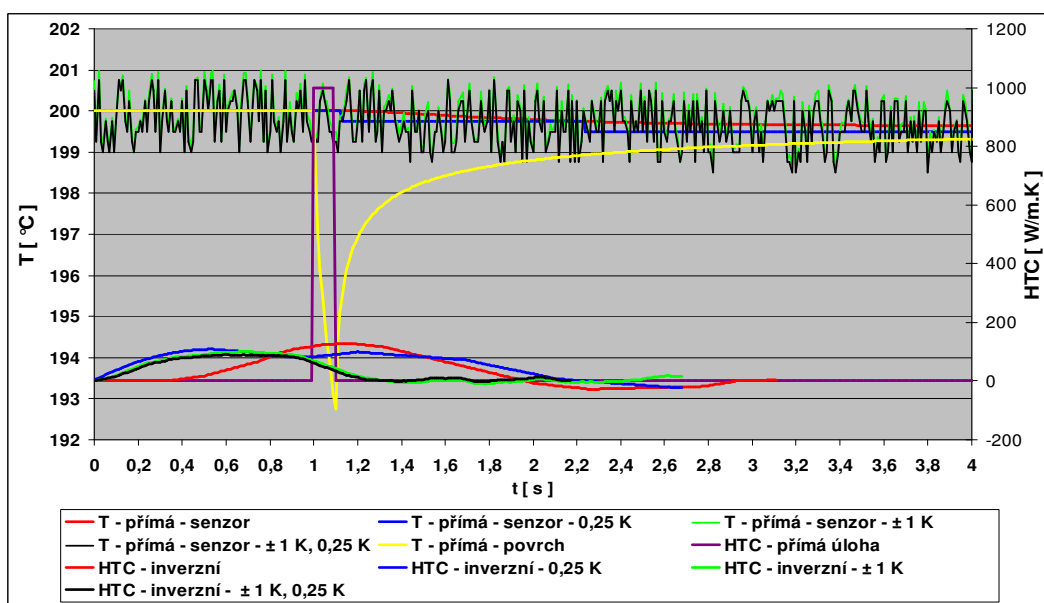


Obr.4.74. Průběhy teplot a HTC pro čidlo č.3; obdélníkový pulz v délce 0,1s a $1\,000\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$; ideální signál, zaokrouhlení 0,25K, šum ± 1 K a šum + zaokrouhlení



Obr.4.75. Průběhy teplot a HTC pro čidlo č.2; obdélníkový pulz v délce 0,1s a $1\,000\text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$; ideální signál, zaokrouhlení 0,25K, šum $\pm 1\text{ K}$ a šum + zaokrouhlení

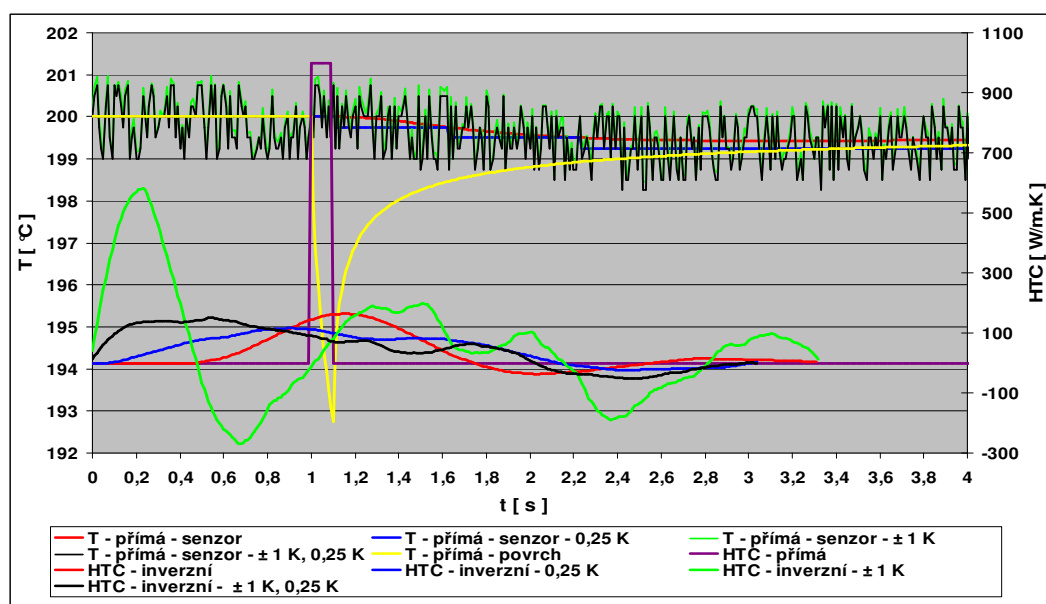
Výpočty se senzorem č.2 ukázaly, že tento typ je schopen zachycovat krátké a dynamické pulzy HTC pouze pokud je vstupní teplotní signál bez zkreslení (viz. grafy na obr.4.75). Výpočty bez zkreslení dosáhly celkové přesnosti 56,18% a suma HTC $9968\text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}.\text{s}$ (přímá úloha $10\,000\text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}.\text{s}$). Dodatečné zkreslování způsobovalo deformaci křivky HTC (roztazení v čase a snížení maxima), což se nepříznivě projevilo na zvýšení počtu dopředných časových kroků (z 16 na 50), poklesu celkové přesnosti (z 56,18 % na 12,5 %). Parametr suma HTC vykazuje pro výpočty se šumem a šum se zaokrouhlováním dokonce záporné hodnoty, což by fyzikálně znamenalo přestup tepla směrem do chlazeného vzorku. Tento senzor proto není vhodný k zaznamenávání dějů s prudkými změnami v řadu trvání několika desetin sekundy.



Obr.4.76. Průběhy teplot a HTC pro čidlo č.1; obdélníkový pulz v délce 0,1s a $1\,000\text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$; ideální signál, zaokrouhlení 0,25K, šum $\pm 1\text{ K}$ a šum + zaokrouhlení

Tab. 4.14. Porovnání přesnosti HTC pro impulzy $1\,000\text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$

číslo senzoru:		1	2	3	4
hloubka senzoru [mm]:		3	1,15	0,4	3,5
Dlouhý časový pulz HTC					
1000 W.m ⁻² .K ⁻¹ bez šumu	poměr HTC _{inverzní} /HTC _{přímá} [-]:	0,1234	0,5618	0,8134	0,1534
	počet dopř. kroků [-]:	99	16	5	79
	suma abs. mimo Δ [W.m ⁻² .K ⁻¹ .s ⁻¹]:	39,82	19,14	5,7	37,8
	suma abs. rozdílů [W.m ⁻² .K ⁻¹ .s ⁻¹]:	68,94	30,55	10,41	64,17
	suma HTC [W.m ⁻² .K ⁻¹ .s]:	9601	9968	9956	10019
1000 W.m ⁻² .K ⁻¹ zaokrouhlení	poměr HTC _{inverzní} /HTC _{přímá} [-]:	0,867	0,2263	0,8479	0,1072
	počet dopř. kroků [-]:	142	30	5	106
	suma abs. mimo Δ [W.m ⁻² .K ⁻¹ .s ⁻¹]:	60,53	31,19	16,2	49,74
	suma abs. rozdílů [W.m ⁻² .K ⁻¹ .s ⁻¹]:	95,93	52,1	20,13	80,11
	suma HTC [W.m ⁻² .K ⁻¹ .s]:	15397	11054	11100	12886
1000 W.m ⁻² .K ⁻¹ šum	poměr HTC _{inverzní} /HTC _{přímá} [-]:	0,571	0,1283	0,3203	0,325
	počet dopř. kroků [-]:	142	50	20	78
	suma abs. mimo Δ [W.m ⁻² .K ⁻¹ .s ⁻¹]:	32,49	38,81	32,99	143,45
	suma abs. rozdílů [W.m ⁻² .K ⁻¹ .s ⁻¹]:	69,04	63,71	50,87	173,58
	suma HTC [W.m ⁻² .K ⁻¹ .s]:	8370	-194	5172	17696
1000 W.m ⁻² .K ⁻¹ šum + zaokrouhlení	poměr HTC _{inverzní} /HTC _{přímá} [-]:	0,291	0,125	0,3203	0,827
	počet dopř. kroků [-]:	142	50	20	106
	suma abs. mimo Δ [W.m ⁻² .K ⁻¹ .s ⁻¹]:	28,97	40,27	33,97	66,01
	suma abs. rozdílů [W.m ⁻² .K ⁻¹ .s ⁻¹]:	65,82	65,24	51,86	97,21
	suma HTC [W.m ⁻² .K ⁻¹ .s]:	7933	-735	4672	14422



Obr.4.77. Průběhy teplot a HTC pro čidlo č.4; obdélníkový pulz v délce 0,1s a $1\,000\text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$; ideální signál, zaokrouhlení 0,25K, šum $\pm 1\text{ K}$ a šum + zaokrouhlení

Posledními dva soubory výpočtů byly provedeny se senzory č.1 (viz. obr.4.76) a č.4. (viz. obr.4.77). Opět byly simulován krátký pulz v trvání 0,1s a s maximem $1\,000\text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$. V obou případech jsou křivky HTC získané inverzním výpočtem naprosto odlišné od okrajové podmínky přímé úlohy. Inverzní výpočet s těmito čidly nedokáže zachytit tvar (zejména maximum) ani délku původního pulzu a to ani v případech bez zkreslení vstupních teplot. Dodatečné zkreslení

vstupního signálu ještě více odchyluje výsledné HTC (např. posouvá maximum v čase). V některých případech dokonce křivka HTC osciluje okolo časové osy výrazně do záporných hodnot. Z těchto důvodů nejsou senzory č.1 a č.4 vhodné k měření krátkých pulzů HTC.

Závěrečné porovnání a vyhodnocení všech senzorů pro krátké pulzy HTC je provedeno v tab.4.15. Nejlepšího hodnocení při výpočtech s dlouhým impulzem HTC dosáhl senzor č.3 a to opět ve všech kritériích. Celková známka je ale o stupeň horší než při výpočtech s dlouhým pulzem HTC. Ostatní senzory získaly stejnou známku (pozn.: zaokrouhlená průměrná známka ze všech hodnotících parametrů). Přesto byly mezi těmito senzory dílčí kvalitativní rozdíly. Senzor č.2 získal druhý nejlepší výsledek (pozn.: hodnocení zaokrouhleno směrem dolů). Tento senzor lze za určitých podmínek používat k měření velmi krátkých dějů, zejména pokud lze předpokládat nedegradovaný teplotní záznam. Zbylé dva senzory se naopak k měření krátkých dějů nehodí. Zejména celková přesnost je nedostatečná. Problematický je i počet časových kroků, který neúměrně prodlužuje inverzní výpočet. Stejnou známku jako č.2 získali tyto senzory jen díky zaokrouhlování průměrné známky směrem nahoru.

Tab. 4.15. Celkové porovnání senzorů pro výpočty s krátkým pulzem HTC

Senzor	Poměr HTC	Počet kroků	suma abs. mimo Δ	suma abs. rozdílů	Suma HTC	Celkové hodnocení
č.1	---	-	-	+	-	- (slabá)
č.2	--	++	+	+	--	- (slabá)
č.3	+	+++	++	++	++	++ (velmi dobrá)
č.4	---	+	-	+	+	- (slabá)

Pozn.: +++ výborná, ++ velmi dobrá, + dobrá, - slabá, -- velmi slabá, --- nedostatečná

Z výše uvedených simulací vyplynulo, že nelepších a nejpřesnějších výsledků lze dosáhnout s použitím senzoru č.3. Kromě numerických vlastností senzorů je při návrhu experimentu nutno uvažovat i jejich technické limity dané vlastní konstrukcí senzorů (podrobně popsáno v kap.3.3). Nejpreciznější senzor č.3 je válcové čidlo o průměru 25 mm. Termočlánek je v senzoru umístěn v drážce zalitý pájkou. Výhodou tohoto řešení je blízkost termočlánku povrchu a s tím spojená vysoká přesnost. Nevýhodou je pak omezení použitelnosti dané bodem tavení pájky. Senzor proto lze používat jen v teplotním intervalu do 320 °C. Další nevýhodou je velikost senzoru, která znemožňuje osazení většího počtu senzoru tohoto typu do zkoumaného vzorku blízko sebe. Senzor č.2 je taktéž válcové těleso ovšem bez pájky omezující použití. Umožňuje proto měření za vysokých teplot až do cca 1250 °C s přesností jen mírně nižší než u předešlého typu. Nevýhodou je opět velikost těla senzoru. Konstrukce senzoru č.4 je založena na umístění termočlánku do díry rovnoběžné s ochlazovaným povrchem. Výhodou tohoto řešení je kromě jednoduchosti, také velikost senzoru (daná velikostí díry pro daný termočlánek). Poloha termočlánku rovnoběžně s předpokládaným průběhem isoterem je vhodná, protože umožňuje ustálení celé délky termočlánku na tutéž teplotu. Zároveň toto řešení umožňuje osadit více

senzorů v témže místě v rozdílných hloubkách od povrchu. Nevýhodou je nemožnost umístění matice senzorů do jedné roviny rovnoběžné s povrchem. Další nevýhodou je pak nižší přesnost zejména u krátkých dějů a aplikací s vyšší hladinou šumu. Senzor je použitelný i za vysokých teplot. Poslední senzor č.1, který ve většině simulací dosahoval nejhorších výsledků, se skládá z termočlásku kolmo zabudovaného na chlazený povrch. Výhodou tohoto typu je jednoduchost, velikost senzoru a směr zabudování termočlásku, což umožňuje měření s velkým počtem senzorů (např. měření sekundárního chlazení při kontinuálním odlévání používá matici 18 senzorů). Největší nevýhodou je vzdálenost termočlásku od povrchu, která je vyšší v porovnání ostatními senzory. Tento aspekt výrazně ovlivňuje přesnost měření pro krátké děje, schopnost měřit data s vysokým obsahem šumu a délku inverzního výpočtu.

Senzor č.1 je vhodný zejména pro aplikace s požadavkem více měřících bodů. Umožňuje zaznamenávat rozsáhlá teplotní pole v čase. Přesnost senzoru je dobrá pro dlouhé pulzy HTC. Pro krátké pulzy a pulzy s vyšším šumem se přesnost výrazně zhoršuje. Je vhodný i pro měření za vysokých teplot. Termočlánek senzor je nutné během měření dotlačovat (závažím nebo pružinou) k čelu díry, tak aby byl dokonalý kontakt pro prostup tepla.

Senzor č.2 používáme tam, kde je požadována vysoká přesnost měření a to i za vysokých teplot. Senzor používáme samostatně nebo v menších počtech pokud to velikost vzorku dovoluje. Senzor je vhodný i pro měření s vyšší hladinou šumu, pokud je zkoumaný děj dostatečně dlouhý (doba trvání v řadech několika sekund). Pro kratší děje je tento typ vhodný jen u měření s nízkou úrovní šumu.

Senzor č.3 se používá tam, kde je požadována vysoká přesnost měření a zároveň nejsou překročeny maximální teploty 320 °C. Senzor používáme samostatně nebo v menších počtech pokud to velikost vzorku dovoluje. Nízká reakční doba umožňuje měření i velmi rychlých dějů (v trvání až 0,1 s). Senzor je vhodný i pro měření, kde lze předpokládat velké zašumění v datech.

Poslední senzor č.4 je vhodný pro aplikace, při kterých je potřeb snímat teplotní záznamy v různých hloubkách pod chlazeným povrchem. Senzor je použitelný i pro vysoké teploty. Senzor, vzhledem k montáži do boku vzorku, není vhodný pro aplikace na plošně rozsáhlé vzorky. Přesnost senzoru je dobrá pro dlouhé pulzy HTC, pro krátké je nižší.

5. Závěr

Práce byla zaměřena na návrh experimentu pro řešení inverzního výpočtu, pro který bylo optimalizováno použití čtyř typů senzorů. V práci byl zjištěn vliv zabudování termočlásků pro každý jednotlivý typ senzoru, objasněna volba optimálního počtu dopředných časových kroků při řešení inverzní úlohy, byl zjištěn vliv šumu v datech a možnost jeho eliminace. S využitím těchto znalostí byl navržen experiment a provedeno vyhodnocení vlivu různých chladiv na přenos tepla. Ke zjišťování účinnosti různých chladiv při různých ostřikových parametrech (např. průtok, tlak



chladiwa nebo procento přidaného oleje) byl využíván nejpřesnější senzor s nejnižší reakční dobou.

Při řešení inverzní úlohy vedení tepla byl použit Beckův sekvenční algoritmus v kombinaci s optimalizační metodou. Metoda, která je matematicky špatně podmíněná, byla nejprve aplikována na zkušební úlohy, čímž byla prokázána vhodnost a přesnost zvoleného přístupu. Po odladění numerického algoritmu byl tento přístup k inverzním úlohám použit k vyhodnocení reálných dat získaných experimentem a k analýze limitů použitelnosti teplotních senzorů.

Experimentální část této práce, jež byla současně součástí evropského výzkumného projektu EWRCOOL (pozn.: RFCS – Research Found for Coal and Steel), obsahovala měření účinnosti chlazení zaměřené na praktické aplikace v hutnictví. Zjištěné výsledky lze využít zejména pro metalurgické procesy v průmyslu jako je chlazení během kontinuálního odlévání, hydraulické odkujování či válcování za tepla. Pro tyto účely bylo v rámci studentského grantu FSI VUT v Brně vyvinuto speciální experimentální zařízení pro zjišťování součinitele přestupu tepla. Experimentální zařízení bylo vybaveno čtyřmi typy různých senzorů, které slouží v Laboratoři přenosu tepla a proudění (LPTaP) k měřením simulujícím výše zmíněné metalurgické aplikace. Provedený experimentální plán byl zaměřen na zjišťování účinnosti chlazení pro různé typy chladiv (pozn. čistá voda, směs vody s olejem, čistý olej), pro velké rozsahy průtoku (pozn. 9 až 24 l/min) a tlaku (pozn.: 1 až 10 barů). Experimenty byly prováděny v teplotním rozsahu do 250 °C. Důvodem bylo zamezení vzniku tepelně izolující parní vrstvy vznikající při dosažení tzv. Leidenfrostovy teploty (pozn.: 400 – 1000 °C) tak, aby bylo možné jasně kvantifikovat vliv jednotlivých chladiv a ostřikových parametrů.

Ze zjištěných výsledků jasně vyplývá, že nejvyšší hodnoty HTC dosahuje čistá destilovaná voda a to v celém rozsahu průtoků a tlaků. Při referenčním tlaku 5 barů dosahovalo HTC průměrné hodnoty $29\,546\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$. Ve zkoumaném intervalu od 1 do 10 barů se hodnoty HTC pohybovaly v rozsahu -46% až +43% vůči referenční hodnotě. Chlazením vodou lze tedy v mnoha technických aplikacích pomocí optimalizace tlaku velice jednoduše a efektivně řídit výrobní proces. Vliv tvrdosti vody (pozn.: rozpuštěné minerální soli) na výsledné HTC nebyl zaznamenán. Získané výsledky se pohybovaly v rozmezí od -3% do + 1% okolo referenční hodnoty, což se pohybuje v rozsahu chyby měření. Výrazný vliv na účinnost chlazení (tzn. velikost HTC) byly zjištěny u olejových emulzí. Přidání oleje do destilované vody způsobí, že hodnoty HTC výrazně klesají.

Zcela novým a dosud nepublikovaným zjištěním byl fakt, že největší pokles HTC nastal už při aplikaci velice nízkých koncentrací, a že další zvyšování koncentrace oleje v chladiwu snižovalo HTC už méně výrazně. Jako příklad lze uvést směs vody a chladiwa Lubrodal RM192, kdy pouhé 0,1% oleje způsobilo pokles HTC o 7,8% vůči čisté vodě. Jednoprocentní směs pak vykazovala pokles HTC o 17,7%, zatímco 50% směs oleje a vody jen o 35,6%. Podobné chování bylo zjištěno i u oleje Rolkleen DP 2062, kdy přidáním pouhých 2% oleje do vody nastal pokles HTC o 16%. Použití čistého oleje vedlo k dalšímu poklesu účinnosti chlazení. Oleje Somentor 34 (pozn.:



100% olej bez vody) vykazoval při referenčním tlaku $8\,500\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ a v celém rozsahu od 1 baru do 5 barů průměrný pokles o 75% vůči HTC pro čistou vodu.

Další experimentální částí této práce obsahovala experimenty s řízeným chlazením. Pomocí řízeného chlazení lze dosáhnout velice zajímavých mechanických vlastností chlazeného materiálu, které by byly při použití pouze vodního chlazení nedosažitelné. Naopak vůči chlazení vzduchem (pozn.: volná konvekce), jež se běžně pro tyto případy používá, vykazuje řízené chlazení výrazně kratších časů. Při experimentech v rozmezí 0 až $250\text{ }^{\circ}\text{C}$ a průtoku chladiva 18 l/min (pozn.: čistá destilovaná voda) byla zjištěna rychlost ochlazování ocelového vzorku $163,6\text{ }^{\circ}\text{C/min}$. Stejný vzorek vystavený vzduchu o průměrné teplotě $19\text{ }^{\circ}\text{C}$ se ochlazoval pouze o $5,3\text{ }^{\circ}\text{C/min}$. Použitím řízeného chlazení se rozsah ochlazovacích rychlostí rozšířil na interval od $28,1\text{ }^{\circ}\text{C/min}$ do $142,8\text{ }^{\circ}\text{C/min}$. Řízené chlazení se tak může stát efektivní alternativou k oběma zmíněným způsobům chlazení.

Volba (ne)vhodného typu teplotního čidla při návrhu experimentu klíčová a zásadně ovlivňuje naměřená data. Poslední část práce se proto zabývala analýzou teplotních čidel a jejich limitů. Tato čidla slouží k záznamu teplot při experimentech studujících přenos tepla. Základním prvkem každého čidla je termočlánek. Analýza byla zaměřena zejména na citlivost, přesnost a reakční dobu čidel. Geometrie čidla a zejména pak hloubka termočláneku od povrchu čidla má zásadní vliv na inverzní výpočet. S detailními numerickými modely, které zahrnovaly i vnitřní geometrii čidel a různé materiálové vlastnosti, byly provedeny inverzní výpočty simulující různá vstupní data. Výpočty nejprve analyzovaly chování a reakci senzorů na tzv. dlouhý pulz HTC v trvání 10s. Následovaly pak výpočty s krátkým pulzem HTC, který trval pouze 0,1s. V obou případech byla použita vzorkovací frekvence 100 Hz, což pro krátký pulz znamenalo pouze 10 časových kroků. Výsledky simulací s dlouhým časovým krokem prokázaly, že všechny čtyři typy zkoumaných čidel dosahují vysoké přesnosti a mají dostatečné rychlou odezvu. Vysoké přesnosti výpočtu bylo dosaženo nejenom pro ideální vstupní data, ale taktéž i pro data s přidaným šumem nebo se sníženou přesností záznamu teplot. Výrazný rozdíl mezi jednotlivými čidly tvořila délka samotného výpočtu, která se zvyšovala s rostoucí vzdáleností termočláneku od chlazeného povrchu. Simulace s rychlými ději ukázaly, že pouze jediný senzor (pozn.: č. 3) s termočlánekem velmi blízko chlazenému povrchu dokáže zachytit takto dynamické pulzy HTC. Zbýlá tři čidla s termočláneky ve větší hloubce nebyla schopná zachytit takto rychlé děje, a to zejména díky nutnosti vysokého počtu časových kroků v inverzním výpočtu (pozn.: počet kroků přesahoval délku samotného pulzu HTC). Nejlepším senzorem, a to pro rychlé i krátké děje, byl senzor č. 3, který se používá k měření chlazení válcovacích stolic. Naopak nejhorší výsledky vykazoval senzor č.1 používaný k měření sekundárního chlazení při kontinuálním odlévání. V práci jsou uvedeny závěry s doporučeními a použitelností všech zkoumaných senzorů. Dosažené výsledky umožňují optimální návrh tepelného experimentu včetně jeho vyhodnocení a umožňují optimální volbu čidel.

Provedený experimentální plán prohloubil znalosti součinitele přestupu tepla pro širokou škálu průmyslových chladiv. Provedené numerické simulace pak přispěly k většímu pochopení praktické použitelnosti a limitů senzorů. Výsledky této práce zde byly publikovány v časopise „Metallurgical and Mining Industry” pod názvem „Research on cooling efficiencies of emulsions and oil”.

6. Conclusion

This Thesis is focused on Design of Experiment to solve the Inverse Heat Transfer Problem for which the usage of four sensor types was optimized. Influence of thermocouples incorporation for each sensor type, optimal number of forward time steps in solving inverse problem algorithm, influence of noise in the recorded data and possibility of noise elimination is presented. Using this knowledge an experiment was designed and the impact of various coolants for heat transfer was evaluated. The cooling efficacy of different coolants for various spraying parameters (e.g. flow rate, coolant pressure or the percentage of added oil) was analyzed using the most accurate sensor with the fastest response.

Beck's sequential approach in combination with optimization method was used in this thesis to solve heat transfer problem inverse task. The method that is mathematically ill-posed was at first applied to trial problems to prove usability and accuracy of chosen procedure. Numerical algorithm of Inverse task was debugged and afterwards applied to real experimental data calculations. Same algorithm was used to analyze temperature sensors abilities and limits.

Experimental part of this study, which was a part of EWRCOOL (note: RFCS – Research Found for Coal and Steel), covers series of cooling efficiency measurements focused on common metallurgical applications. Results discovered in this study can be applied mainly to following industrial processes such as continues casting, hydraulic descaling or hot rolling, where precise knowledge of boundary condition is nowadays essential. Special experimental test bench, funded by FME BUT student's grant, was developed and build to measure heat transfer. There were four different types of thermal sensors applied to the test bench and studied. Those specific sensors developed in Heat transfer and fluid flow laboratory (Heatlab) are being used to simulate previously mentioned metallurgical applications. Experimental plan, which was run at this test bench, was focused on cooling efficiency of various coolant types (note: pure water, water-oil mixtures and pure oils) in wide range of flow parameters (flow rate of 9 - 24 l/min and coolant pressure from 1 up to 10 bar). Experiments were run in temperature range up to 250 °C. Value of 250 °C was picked up to prevent isolating vapour layer formation above so called Leidenfrost temperature (note: 400 – 1000 °C), and to be able to clearly quantify influence of each coolant and flow parameter.

Our findings clearly demonstrate pure water as most efficient coolant with highest HTC values in whole range of coolant pressures and flow rates. Reference measurements, for pure water at 5



bar, show average HTC value of $29\,546\text{ W.m}^{-2}\text{.K}^{-1}$. Pure water was analyzed in range of 1 up to 10 bars, where HTC varies from -46% to +43% comparing to reference measurement. Consequently water cooling can be in many industrial applications easily optimized by pressure control. There was no influence of water total hardness noticed at any experiment. Differences in HTC for pure and diluted water were between -3% and +1%, which is in range of measurement error. On the other hand a significant impact on cooling efficiency (the size of HTC) has been detected in oil emulsions. Extra oil content in pure water causes massive decrease of the HTC values. Interesting new and unpublished finding was that the largest decrease occurred if very low oil concentrations were applied and further oil concentration increases in the cooling system have reduced the HTC not so much. For example, a cooling mixture of water and Lubrodal RM192, where only 0.1% oil content caused a drop by 7.8% comparing to pure water HTC. One percentage mixture showed a decrease of 17.7% HTC, while 50% mixture of oil and water, only 35.6%. Similar behavior was also found if Rolkleen DP 2062 oil was used, where only 2% of oil in water caused HTC downturn of 16%. Consequently usage of pure oil led to a further decrease in cooling efficiency. Somentor 34 oil performed at reference pressure $8500\text{ W.m}^{-2}\text{.K}^{-1}$ and in entire interval of 1 to 5 bars showed an average decrease by 75% comparing to pure water HTC.

Another part of this experimental work includes experiments with controlled cooling. If the controlled cooling is used very fine mechanical properties of cooled material can be achieved. Such a positive property would be with strictly water cooling unattainable. Comparing to air cooling (note: free air convection), which is commonly used for these applications, much shorter cooling times can be reached. Experiments in the range of 0-250 °C with coolant flow rate of 18 L/min (note: pure distilled water) discovered a cooling speed of 163.6 °C/min for steel sample. The same sample exposed to the air with an average temperature of 19 °C, cooled down only by 5.3 °C/min. Using a controlled cooling the cooling rate range was extended to the interval starting from 28.1 °C/min up to 142.8 °C/min. Therefore controlled cooling may become an effective alternative to the ambient air and pure water cooling.

The (un)suitable choice sensor type during the design of experiments critical and significantly affects the measured data. Temperature sensors analysis was therefore another part of this thesis. Several specific thermal sensors were studied with regards to heat transfer experimental data recoding. Basic feature of all thermal sensors is thermocouple. Analysis was mainly focused on sensitivity, accuracy and reaction time of such sensors. It is assumed that geometry and mainly thermocouple distance to cooled surface has crucial influence on inverse task calculation. Very detailed numerical sensor models, that include internal sensor geometry and various material properties, were prepared and inverse calculations simulating various input data were performed. First batch of calculations has analyzed behavior and sensor responses to the so-called long duration HTC pulses in range of 10 seconds. Long duration pulses were followed by calculations that have used short HTC pulses, which lasted only 0.1 second. In both cases, the sampling frequency of 100 Hz was used. It means only 10 time steps duration of short pulses.



Long duration simulation results have proven that all four different sensor types, which were under investigation, perform very high accuracy and have very fast response. Very high accuracy was obtained not only for ideal input data, but as well for data with artificial noise and with reduced thermocouple recording accuracy. Important difference among treated sensors was required computer calculation time. Calculation time requirements were growing in relationship to increasing thermocouple distance to cooled surface. Short HTC duration simulations have resulted in findings, that only one sensor type (note: sensor no. 3) with thermocouples closest to the surface is able to measure such a dynamic HTC pulse. The other three sensors with thermocouples at greater depth have not been able to capture those fast HTC pulses, mainly due to the need for a large number of time steps in the inverse calculation (note: the number of required steps exceeds the length of the actual pulse HTC). The best sensor, for both long and short duration HTC pulses, was the sensor no. 3. This type of sensor is used to measure rolling mills cooling. The worst results were performed by sensor no.1, which is used to measure the secondary cooling intensity in continues casting processes. The paper presents conclusions and recommendations to all examined sensors. The achieved results enable the optimal design of heat experiment, including its evaluation and provide the optimal choice of sensor for each specific application.

Experimental study has increased the knowledge of HTC for wide range of industrial coolants. Numerical analysis has improved understanding of temperature sensor behavior, their proper usage and measuring limits. The main results of this study have been published in the journal „Metallurgical and Mining Industry” so called „Research on cooling efficiencies of emulsions and oil”.



7 Literatura

1. Sazina, M. a kol., „Teplo“, SNTL, Praha, 1989.
2. Incopera, F.P., DeWitt, D.P., „Fundamentals of Heat and Mass Transfer“, Purdue University, USA, 4.vydání, 1996.
3. Jícha, M., „Přenos tepla a látky“, CERM Brno, 2001.
4. Pohanka, M., „Technical Experiment Based Inverse Tasks in Mechanics“, závěrečná doktorská práce, LPTaP FSI VUT v Brně, 2006.
5. Raudenský, M., „Použití kubických splajnů pro řešení nestacionárních úloh vedení tepla“, závěrečná doktorská práce, FSI VUT v Brně, 1984.
6. Raudenský, M., „Inverzní úlohy vedení tepla“, habilitační práce, FSI VUT v Brně, 1992.
7. Patankar, S.V., „Computation of conduction and duct flow heat transfer, USA, 1991
8. Legras, J., „Praktické metody pro řešení parciálních diferenciálních rovnic“, Praha, SNTL1960.
9. Čermák, L., „Algoritmy metody konečných prvků“, PC-DIR, Brno 2000.
10. Čermák, L., „pracovní verze skript – lineární programování a numerické metody“.
11. Ražnjevič, K., „Termodynamické tabulky“, Bratislava, 1984.
12. Ženišek, A., „Matematické základy metody konečných prvků“, PC-Dir Brno, 1999.
13. Woodbury, K.A., „Inverse engineering handbook“, CRC Press, 2003.
14. Klapka, J. a kol., „Metody operačního výzkumu“, Vutium, Brno 2001.
15. Horák, A., Vavrečka, L., „Žádost o udělení grantu VaV 2005“, FSI VUT v Brně, 2005
16. Horák, A., Vavrečka, L., „Vývoj a výroba experimentálního zařízení pro řízené chlazení kovových vzorků – závěrečná zpráva“, FSI VUT v Brně, 2006.
17. Raudenský, M., Horák, A., Pohanka, M., Juriga, A., „Contamination Trials“, technická zpráva v rámci projektu EWRCOOL, 2006.
18. Tikhonov, A. N., Arsenin, V. Y., „Solution of Ill-Posed problems“, Washington D.C., Winston, 1977, ISBN 0470991240.
19. Beck, J.V., Arnold, K.J., „Parameter Estimation in Engineering and Science“, Wiley
20. Beck, J.V., Blackwell, B., Clair, C.R., „Inverse Heat Conduction“, Wiley, New York 1985.
21. Horák, A., Horský, J., „Tepelné zpracování materiálu V140Ti“, technická zpráva pro Vítkovické slévárny, září 2006, Brno.
22. „Manual on the use of thermocouples in temperature measurement“, American society for testing and materials, STP 470 B, 6th edition, 1992, Baltimore.
23. Seebeck, T.J., „Evidence of the Thermal Current of the Combination Bi-Cu by Its Action on Fourier Needle“, Royal Academy of Science, Berlin.
24. Peltier, J.C.A., „Investigation of the Heat Developed by Electric Currents in Homogenous Material and at the Junction of Two Different Conductors“.



25. ASTM Standard E 230, "Temperature-Electromotive Force (EMF) Tables for Thermocouples", 1980, Annual Book of ASTM Standards, Part 44.
26. „The International Practical Temperature Scale of 1968“, Metrologia, Vol. 5, No.2, duben 1968, strana 34 - 49.
27. „The International Practical Temperature Scale of 1968 Amended Edition of 1975“, Metrologia, Vol. 12, No.1, březen 1975, strana 7 - 17.
28. Stimson, H.F., „International Practical Temperature Scale of 1948, text revision of 1960“, NBS Monograph 37, National Bureau of Standards, 1961.
29. Harper, D.R., „Thermometric Lag“, NBS Science Paper 185, National Bureau of Standards, březen 1912.
30. Benedict, R.P., „Fundamentals of Temperature, Pressure and Flow Measurements“, Second Edition, Wiley, New York, 1977.
31. Horák, A., Raudenský, M., Pohanka, M., Bellerová, H., Reichardt, T., „Research on cooling efficiencies of emulsions and oil“, Metallurgical and Mining Industry, Ukrajina, 2010, Vol. 2, No. 4, str. 271 – 278.
32. Horák, A., Bellerová, H., „Influence of Coolant Type on Cooling Spray Intensity“, In IM 2007, Svratka, Czech Republic, May 14-17, 2007, ISBN 978-80-87012-06-2.
33. Horák, A., Bellerová, H., „Influence of Coolant Type on Cooling Spray Intensity“, In IM 2007, Svratka, Czech Republic, May 14-17, 2007, ISBN 978-80-87012-06-2.
34. Wallis, R.A., Garwood, R., Ward, J., Xia, Q., „Quenching Using Air-Water Mixtures“, 2nd International Conference on Quenching and the Control of Distortion, Cleveland, USA, November 1996.
35. Shin'ichi, A., Sato K., „Experimental Study of Heat Transfer Coefficient with Temperature and Kinetic Viscosity on Mineral Oil and Molten Salt“, Journal of the Ceramic Society of Japan, Int. Edition, Vol. 103-373.
36. Tachibana, Shioji, S., Trans. JSME, 38, 1056-1064, 1972.
37. Sato, K., Sci. Eng. Rept. Tohoku Gakuin Univ. 20, 129-136, 1986.
38. Renhof, L., Guder, S., Werner, E., „Hardiness and phase analysis of IN718 deformed at high strain rate“, <http://www.springerlink.com>, staženo 6.9.2008.
39. Hambræus, K., „A Comparison of the Heat Transfer Coefficient for Evaporation of Pure HFC134a and HFC134a-oil Mixtures“, Recenet Advances in Heat Transfer, 149 – 161, 1992.
40. <http://en.wikipedia.org/wiki/HFC-134a>, staženo 16.9.2008.
41. „DuPont HFC-134a“, technická specifikace firmy Dupont, staženo z oficiálních stránek 16.9.2008.
42. Chaddock, J., Buzzard, G., „Film coefficients for in-tube evaporation of amonia and R-502 with and without small percentages of minerál oil“, ASHARE Trans., vol. 92, part 1A, pp 22-, 1986.



43. Schlager, L.M., Pate, M.B., Berglas, a.E., „Performance of micro-fin tubes with refrigerant-22 and oil mixture“, ASHARE Journ., pp17-, nov. 1989.
44. Pohanka, M., „Limitation of thermal inverse algorithm and boundary conditions reconstruction for very fast changes on boundary“, Engineering Mechanics 2007, Svratka, pp.229-230, ISBN 978-80-87012-06-2, 2007.
45. Hall, D.,Mudawar, I., „Int. J. Heat Mass Transfer 38“, 1995, No.7, 1201.
46. Ciofalo, M., Di Piazza, I., V. Brucato, V. „Int. J. Heat Mass Transfer 42“, 1999, No.7, 1157.
47. Ciofalo, M., Caronia, A., Di Liberto, M., Puleo, S., „International Journal of Heat and Mass Transfer 50“, 2007, No.25-26, 4948.

8. Publikace a projekty autora

Publikace:

1. Horák, A., Raudenský, M., Pohanka, M., Bellerová, H., Reichardt, T., „Research on cooling efficiencies of emulsions and oil“, Metallurgical and Mining Industry, Ukrajina, 2010, Vol. 2, No. 4, str. 271 – 278.
2. Boháček, J., Horák, A., „Water-hammer effect during descaling“, Frontier of Mechanical Engineering, Academic Publishing Centre, Higher Education Press, Čína, Peking, 2010.
3. Horák, A., Bellerová, H., „Influence of Coolant Type on Cooling Spray Intensity“, In IM 2007, Svratka, ČR, May 14-17, 2007, ISBN 978-80-87012-06-2.
4. Horák, A., Boháček, J., „High – Speed Droplet Impact During Hydraulic Descaling Process“, In IM 2007, Svratka, ČR, May 14-17, 2007, ISBN 978-80-87012-06-2.
5. Raudenský, M., Horák, A., Horský, J., Pohanka, M., Kotrbáček P., „Hydraulic Descaling Improvement, Findings of Jet Structure on Water Hammer Effect“, La Revue de Métallurgie, February 2007, SSN 0035-1563(print edition), ISSN 1156-3141.
6. Raudenský, M., Horák, A., Horský, J., Pohanka, M., Kotrbáček, P., „Hydraulic Descaling Improvement – Findings of jet Structure on Water Hammer Effect“, La Revue de Mettallurgie – ATS – JSI, Paris 14 – 15 December 2006, pp. 34-35.
7. Horák, A., Střítecký, P., „Influence of Surface Roughness on Spray Cooling Intensity in High Temperature Applications“, Engineering Mechanics 2005, May 9-12, 2005, Svratka, ČR, ISBN.80-85918-93-5.
8. Horák, A., Střítecký, P., „Influence of Surface Roughness on Spray Cooling Intensity in High Temperature Applications“, Engineering Mechanics 2005, May 9-12, 2005, Svratka, ČR, rozšířený abstrakt.
9. Raudenský, M., Horák, A., Kotrbáček, P., „Optimization Of Controlled Cooling in Continuous Casting“, článek ve sborníku 1st International Conference on Simulation and Modelling of



Metallurgical Processes in Steelmaking, 25 - 27 October 2005, ISBN.80-239-5005-3, Brno, ČR.

10. Morávka, J., Kuběna, J., Raudenský, M., Horák A., „Závislost Leidenfrostovy teploty a HTC na parametrech ostříku u vodních trysek“, Sborník přednášek 15. mezinárodní konference metalurgie a materiálů METAL 2006. Ostrava : Tanger, 23.-25.5.2006, referát č.86, 8 s. ISBN 80-86840-18-2.
11. Horák, A., Vavrečka, L., „Vývoj a výroba experimentálního zařízení pro řízené chlazení kovových vzorků“, poster pro VaV FSI VUT v Brně, 2006.
12. Raudenský, M., Horsky, J., Horák, A., Kotrbáček, P., „Contamination Trials“, průběžná technická zpráva k projektu Effective Roll Cooling, 2006, ČR.
13. Raudenský, M., Horsky, J., Kotrbáček, P., Horák, A., „Contamination Trials - summary“, závěrečná technická zpráva k projektu Effective Roll Cooling, 2007, ČR.

Funkční vzorky:

1. Raudenský, M., Horský, J., Kotrbáček, P., Pohanka, M., Juriga, A., Horák, A., „Kolektor pro mezistolicové chlazení oceli“, aplikováno v U.S.Steel Košice, s.r.o., 2007, SR.
2. Raudenský, M., Horský, J., Kotrbáček, P., Horák, A., Vavrečka, L., „Experimentální zařízení pro řízené chlazení kovových vzorků“, aplikováno v LPTaP FSI VUT v Brně, 2007, ČR.

Účast na projektech:

1. „Měření chlad. char. trysek používaných na Minihuti na ploché výrobky, sekundar. chlazení, zóna 3“, Mittal Steel Ostrava a.s., HS1360144, srpen 2006.
2. „Měření chlad. char. Trysek používaných na Minihuti na ploché výrobky, sekundar. chlazení, zóna 2“, Mittal Steel Ostrava a.s. , HS1360144, červenec 2006.
3. „HTC Measurements Sidmar - 47 experiments - long nozzles“, HS1360064, Lechler GmbH, Germany, červenec 2006.
4. „Optimalizace parametrů chlazení vybrané zóny sekundárního chlazení bramového ZPO/Měření chladících charakteristik trysek používaných na Minihuti na ploché výrobky, sekundární chlazení, zóna 2“, HS1360144, Mittal Steel Ostrava a.s., červenec 2006.
5. „Contamination Trials“, RU1340001, EWRCOOL, květen 2006.
6. „Essential Groups of heat Transfer Experiments“, RU1340001, EWRCOOL, květen 2006.
7. „Surface Chilling Test - 3 nozzles“, HS1360031, Corus Netherlands, duben 2006.
8. „Optimalizace návrhu pro systémy mezistolicového chlazení na TŠP s využitím kuželových trysek - supplement 2006“, HS1350195, U.S. STEEL Košice, leden 2006.



9. „Porovnání intenzity chlazení pro systémy mezistolicového chlazení na TŠP“, HS1350195, U.S. STEEL Košice, prosinec 2005.
10. „Výzkum a vývoj nového elektromagnetického hladinoměru pro tekuté kovy“, FI134S007, VÚHŽ,a.s., prosinec 2005.
11. „Stanovení tlaků a průtoků potřebných pro chlazení válců na SJV“, HS1350128, Mittal Steel Ostrava a.s., prosinec 2005.
12. „Research on Heat Transfer Characteristics of Impact by Spray and Laminar Jet“, HS1350009, POSCO Korea, září 2005.
13. „HTC Impact Compare, HTC Pulse“, HS1350032, Lechler GmbH, Germany, březen 2005.
14. „Roll Cooling with Full Cone and Flat Jet Nozzles“, HS1340193, Lechler GmbH, Germany, únor 2005.
15. „Proměření 3 typů trysek pro 3 rychlosti, používaných na sochorovém ZPO objednatele za účelem zjištění chladících účinků v sekundární zóně chlazení na základě obj. č.491/4500148788.“, HS1340226, Třinecké železárny, a.s., prosinec 2004.

