



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

LABORATOŘ PŘENOSU TEPLA A PROUDĚNÍ

HEAT TRANSFER AND FLUID FLOW LABORATORY

**METODY PROSTOROVÉ A SPEKTRÁLNÍ
CHARAKTERIZACE SVĚTELNÝCH ZDROJŮ
POUŽÍVANÝCH V AUTOMOBILOVÉ TECHNICE**

METHODS OF SPACE AND SPECTRAL CHARACTERIZATION OF LIGHT SOURCES USED IN CAR INDUSTRIES

DIZERTAČNÍ PRÁCE

DOCTORAL THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Ing. Michal Guzej

ŠKOLITEL

SUPERVISOR

prof. Ing. Jaroslav Horský, CSc.

BRNO 2018

Abstrakt

Automobilové světlomety jsou vystaveny velice proměnným provozním podmínkám, během kterých musí zaručit svou primární funkci vidět a být viděn. Snahou výrobců je během vývoje nových světlometů eliminovat nedostatky, které by v provozu vedly k závadám. Vhodnými nástroji k odhalení problematických míst jsou spolu s numerickými simulacemi i testovací procedury. Nejvýhodnější je navrhovat experiment s ohledem na následné jednoduché implementování naměřených dat do softwarů pro tvorbu numerických simulací a citlivě zvolit způsob měření sledovaných fyzikálních veličin. Velká část práce je věnována problematice kondenzace ve světlometech, která má negativní vliv na světelnou stopu a životnost. Proto byla vyvinuta metodika experimentálního odmlžování, kdy je do světlometu vypařeno známé množství vody, která je následně zkondenzována na vnitřní ploše předního skla. Z měření jsou pořízeny fotografie, na kterých jsou automaticky detekovány zamlžené a odmlžené oblasti. Výsledky jsou použity pro naladění a ověření numerického modelu odmlžování. Další část je věnována měření teplotnímu zatížení komponent světlometu, které jsou ohřívány nejvíce odpadním teplem ze světelných zdrojů, což je závislé hlavně na typu zdroje, emisivitě a tepelné vodivosti. Byla vyvinuta metodika měření teplot, měření tepelné vodivosti plastových materiálů, nestacionární způsob stanovení emisivity lesklých povrchů a prostorový popis světelných halogenových zdrojů na základě jejich tepelných toků do okolí.

Klíčová slova

automobilový světlomet, kondenzace, odmlžení, emisivita, teploty, termočlánky, tepelná vodivost, numerické simulace, LED čipy, halogenové žárovky

Summary

Automotive headlamps work in very variable operating conditions during which the producer have to guarantee their primary function of seeing and being seen. During the development stage of the new headlamps the manufacturers want to eliminate defects which could led to malfunction in operation. The numerical simulations along with the test procedures are appropriate tools for detection of problematic areas. The most appropriate approach is designing of experiment with a view to the subsequent simple implementation of the measured data into numerical simulations software and carefully choosing a measuring method of the monitored physical quantities. The thesis deals with phenomenon of condensation in headlamps, which has a negative effect on the light distribution and their life expectancy. Due to this experimental defog methodology was developed based on evaporation of a specified amount of water into the headlamp and then condensation on the inside surface of the headlamp lens. Pictures are taken during the measurements and the fogged and defogged areas are automatically detected. The results from experiments are used to adjust and verify a numerical model. The next part is devoted to the thermal load of the headlamp components which are mostly heated by waste heat from light sources. This phenomena depends mainly on the type of source, emissivity and thermal conductivity. A methodology of temperature measurement, thermal conductivity measurement, non-stationary method for emissivity determination and spectral characterization of thermal source based on their thermal fluxes to the surroundings has been developed.

Keywords

automotive headlamp, condensation, defogging, emissivity, temperatures, thermocouples, thermal conductivity, numerical simulations, LED chips, halogen bulbs

Bibliografická citace

GUZEJ, M. *Metody prostorové a spektrální charakterizace světelných zdrojů používaných v automobilové technice*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2018. XY s. Vedoucí dizertační práce prof. Ing. Jaroslav Horský, CSc..

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem dizertační práci *Metody prostorové a spektrální charakterizace světelných zdrojů používaných v automobilové technice* vypracoval samostatně pod dohledem školitele mé práce prof. Ing. Jaroslava Horského, CSc. s použitím podkladů uvedených v seznamu bibliografie.

V Brně dne:

Ing. Michal Guzej

Poděkování

Rád bych poděkoval svému vedoucímu prof. Ing. Jaroslav Horský, CSc. za jeho vedení a cenné rady během celého mého studia v Laboratoři přenosu tepla a proudění. Dále bych chtěl poděkovat Ing. Davidu Gallovičovi za čas, který mi věnoval při nesčetných konzultacích a jeho pomoc při tvorbě numerického modelu odmlžování světlometů.

Ing. Michal Guzej

Obsah

| | |
|--|-----------|
| VYMEZENÍ CÍLŮ DIZERTAČNÍ PRÁCE | 4 |
| ÚVOD | 6 |
| 1. TEORETICKÁ ČÁST | 7 |
| 1.1. ZÁKLADNÍ ČÁSTI HLAVNÍHO PŘEDNÍHO SVĚTLOMETU | 7 |
| 1.2. DRUHY SVĚTELNÝCH ZDROJŮ | 8 |
| HALOGENOVÉ ŽÁROVKY | 8 |
| VÝBOJKY | 8 |
| LED ČIPY | 8 |
| 1.3. TYPY SVĚTLOMETŮ A MODERNÍ SYSTÉMY OSVĚTLENÍ | 9 |
| PARABOLICKÉ SVĚTLOMETY | 9 |
| ELIPSOIDNÍ SVĚTLOMETY | 9 |
| SVĚTLOMETY S VOLNÝMI ODRAZOVÝMI PLOCHAMI | 9 |
| BI-XENONOVÝ S PROJEKČNÍ JEDNOTKOU | 10 |
| ADAPTIVNÍ SVĚTLOMETY | 10 |
| 1.4. DRUHY PŘENOSU TEPLA | 11 |
| VEDENÍ (KONDUKCE) | 11 |
| PROUDĚNÍ (KONVEKCE) | 12 |
| ZÁŘENÍ (RADIACE) | 13 |
| 1.5. MĚŘENÉ PARAMETRY SVĚTLOMETŮ | 14 |
| VÝKONY SVĚTELNÝCH ZDROJŮ | 14 |
| TERMOFYZIKÁLNÍ VLASTNOSTI | 15 |
| EMISIVITY POVRCHŮ | 16 |
| ROZLOŽENÍ TEPLA VE SVĚTLOMETECH | 16 |
| 1.6. ODMLŽENÍ A ZAMLŽENÍ SVĚTLOMETŮ | 18 |
| ABSORPCE A UVOLŇOVÁNÍ VZDUŠNÉ VLHKOSTI POLYMERY | 18 |
| PŘÍKLAD POROVNÁNÍ MNOŽSTVÍ VLHKOSTI VE VZDUCHU A V PLASTECH SVĚTLOMETU | 19 |
| POKLES TEPLoty OKOLÍ | 20 |

| | |
|--|-----------|
| 1.7. PŘEHLED STÁVAJÍCÍ SITUACE TESTOVÁNÍ ODMLŽENÍ | 21 |
| TESTOVACÍ PROCEDURY | 22 |
| TESTOVÁNÍ V KONTROLOVANÉM PROSTŘEDÍ | 22 |
| TESTOVÁNÍ POMOCÍ PROVOZNÍCH ZKOUŠEK | 23 |
| ZPŮSOB TVORBY KONDENZACE VE SVĚTLOMETU | 24 |
| NEVÝHODY POUŽITÝCH POSTUPŮ | 24 |

2. PRAKTICKÁ ČÁST **25**

| | |
|---|-----------|
| 2.1. MĚŘICÍ ZAŘÍZENÍ PRO TESTOVÁNÍ ODMLŽENÍ SVĚTLOMETŮ | 25 |
| VÝVOJ MĚŘICÍHO ZAŘÍZENÍ | 29 |
| 2.2. ZVLHČOVAČ - ZAŘÍZENÍ PRO ZAVÁDĚNÍ VLHKOSTI | 32 |
| 2.3. AUTOMATICKÁ DETEKCE KONDENZÁTU Z FOTOGRAFIÍ | 35 |
| ALGORITMUS PROGRAMU | 35 |
| ZPŮSOBY OSVĚTLOVÁNÍ | 38 |
| 2.4. EXPERIMENTÁLNÍ ODMLŽOVÁNÍ SVĚTLOMETŮ | 40 |
| ZAMLŽOVÁNÍ – PŘÍPRAVNÁ FÁZE | 42 |
| ODMLŽOVÁNÍ – HLAVNÍ FÁZE | 46 |
| 2.5. NUMERICKÉ SIMULACE ODMLŽOVÁNÍ SVĚTLOMETŮ | 50 |
| POROVNÁNÍ VÝSLEDKŮ ODMLŽENÍ Z EXPERIMENTŮ A SIMULACÍ | 53 |
| 2.6. PROGRAM PRO OVLÁDÁNÍ A ZÁZNAM DAT Z ODMLŽOVACÍCH TESTŮ | 60 |
| 2.7. MĚŘENÍ TEPLOTNÍHO ZATÍŽENÍ SVĚTLOMETŮ | 63 |
| STUDIE VLIVU ZABUDOVÁNÍ TERMOČLÁNKU NA MĚŘENÉ TEPLoty | 63 |
| STUDIE VLIVU SVĚTELNÉHO ZDROJE NA MĚŘENÉ TEPLoty | 72 |
| 2.8. STANOVENÍ EMISIVITY LESKLÝCH POVRCHŮ | 80 |
| MĚŘENÍ | 80 |
| NUMERICKÝ MODEL | 82 |
| ZPRACOVÁNÍ A VYHODNOCENÍ NAMĚŘENÝCH DAT | 86 |
| 2.9. MĚŘENÍ TEPELNÉ VODIVOSTI | 90 |
| 2.10. MĚŘENÍ PROSTOROVÝCH TEPELNÝCH VÝKONŮ SVĚTELNÝCH ZDROJŮ | 94 |
| ZÁVĚR | 98 |

| | |
|-------------------------|-----|
| SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ | 101 |
|-------------------------|-----|

| | |
|---|-----|
| SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ | 106 |
| SEZNAM OBRÁZKŮ | 108 |
| SEZNAM TABULEK | 112 |
| VLASTNÍ PUBLIKACE VZTAHUJÍCÍ SE K TÉMATU DIZERTAČNÍ PRÁCE | 113 |
| SEZNAM VLASTNÍCH PUBLIKACÍ | 113 |
| UDĚLENÉ PATENTY | 114 |
| FUNKČNÍ VZORKY | 114 |
| PŘÍLOHY | 114 |

Vymezení cílů dizertační práce

Jednotlivé cíle dizertační práce jsou formulovány na základě statní doktorské zkoušky následovně.

- Základní popis předních automobilových světlometů s ohledem na konstrukci a použité světelné zdroje.
- Zpracování metodiky testování světlometů pro různé provozní podmínky. Se zaměřením na měření teplot, tepelné vodivosti, emisivity a kondenzaci.
- Naměřené výsledky z experimentů použít pro ověření a přesné nastavení počátečních a okrajových podmínek v numerických simulacích
- Vyhodnocení výsledků experimentů s využitím metod numerické matematiky a zpracování obrazové analýzy.

Úvod

Automobilové světlomety pracují ve velice proměnných klimatických podmínkách. Jejich základní charakteristikou je velké tepelné zatížení dílů v blízkém okolí světelných zdrojů [2] (Xenonových výbojek, LED čipů a výjimečně i neonových trubíc [1]) a malé výměně vzduchu s okolím [3]. V kombinaci s určitými klimatickými jevy, které zapříčiní rychlý pokles okolní teploty, může dojít k nahromadění vzdušné vlhkosti uvnitř [4] a následnému z kondenzování na vnitřních površích a to hlavně na předním skle. Tento nepříznivý efekt má za následek snížení světelných parametrů [5], degeneraci vnitřních materiálů, korozi kovových dílů a elektrický zkrat elektroniky světlometu [6].

Tvar světlometů podléhá designovým požadavkům na celkový vzhled automobilu a v této koncepci marketingu hrají přední světlomety důležitou roli [7], [8], [9], [10], [11]. Je proto potřeba při jejich konstrukci skloubit nároky designérů s požadavky technickými: životnost, bezpečnost, funkčnost atd. [12].

Problém odvodu přebytečné vlhkosti je řešen mnoha způsoby. Nanesení tenké anti-fog vrstvy, která nezabrání tvorbě kondenzace [13], ale vytvoří homogenní vodní film, který není okem vidět. Dále vhodným umístěním ventilačních otvorů [4], [14], vložením membrány z mikro-porézní tkaniny do odvětrávacích otvorů, která umožňuje výměnu vzduchu, ale zabraňuje vniknutí vody [14]. Rovněž jsou využívány numerické simulace motorového prostoru [15] a jsou hledána místa s nejvyšší hodnotou dynamického tlaku a do těchto míst jsou následně umístěny ventilační otvory [14]. Konečný počet otvorů je stanoven na základě experimentů s požadavky na co nejrychlejší odmlžení předního skla světlometu [6]. Další možností je přivádět tlakový vzduch z prostoru chladiče za přední maskou, čímž je zkrácen čas potřebný k výměně média ve světlometu. Nevýhodou tohoto způsobu je cenová náročnost a nutnost požití velkých prachových filtrů na přívodních místech. U levnějších modelů jsou do ventilačních otvorů umístěny plastové labyrinty. Prachové částice při průchodu těmito labyrinty jsou zachyceny díky zpomalení proudění vzduchu.

Rovněž byly vyvinuty nástroje pro predikci tepelného zatížení [16]. Pro ověření jejich výsledků bylo zapotřebí využít experimentů, které měly shodné podmínky se simulacemi [17]. Měření teplot z experimentu je prováděno pomocí termočlánků, nebo infrakamery. Pro obě zmíněné metody je nutno dodržet určité postupy a doporučení. Pro měření termočlánky je důležité vhodně zvolit jeho typ a způsob zabudování. U infrakamery je důležité znát přesně emisivitu měřeného povrchu.

Autorem práce bylo ve spolupráci se společností Škoda Auto a.s. vyvinuto experimentální zařízení pro zmapování rychlosti odmlžení předních automobilových světlometů. Impulzem pro vývoj tohoto zařízení bylo zpřesnění procedury odmlžování (zamlžování) a dosažení lepší opakovatelnosti a zkvalitnění dosažených výsledků, které je možno použít i pro verifikaci numerických simulací odmlžování. Rovněž byla vytvořena metodika měření teplotního zatížení komponent světlometů za přesně definovaných podmínek se zaměřením na správné zabudování termočlánku, které je pro kvalitu dosažených výsledků kritické. Dále prostorové zmapování tepelných výkonů používaných halogenových světelných zdrojů, měření termofyzikálních vlastností plastových materiálů běžně používaných ve světlometech, spolu s měřením emisivit lesklých (pokovený povrch reflektorů).

1. TEORETICKÁ ČÁST

V této kapitole budou vysvětleny a popsány všechny hlavní pojmy automobilových předních světlometů, jejich konstrukční provedení. Dále použité světelné zdroje, které jsou důležité z pohledu teplotního zatížení komponent světlometu. Teplo a jeho přenos hraje důležitou roli v teplotním managementu a je důležité pro vhodné rozmístění citlivých elektrických součástí. Dalším důležitým tématem je tvorba kondenzace ze vzdušné vlhkosti uvnitř světlometu, což je negativní efekt. Snahou výrobců automobilů ve spolupráci s dodavateli světlometů je eliminovat nebo alespoň omezovat tento jev. Testováním světlometů na odmlžení není jednoduché a v současnosti neexistují jednotné postupy, proto jsou na konci teoretické části vypsány nejběžnější způsoby testování.

1.1. Základní části hlavního předního světlometu

Hlavním předním světlometem je zařízení umístěné v přední části vozidla, jehož funkce je poskytnout řidiči automobilu dostatečné osvětlení vozovky za zhoršených světelných podmínek a zároveň být viděn ostatními účastníky silničního provozu [18], [19]. Základní stavební jednotkou pláště je pouzdro 1 a krycí sklo 2. Pouzdro 1 je na zadní straně vybaveno odvětrávacími otvory 3 vnitřního prostoru a úchyty 4 pro připevnění světlometu ke konstrukci vozidla. Ve vnitřním prostoru je reflektor 5 se zabudovanými světelnými zdroji 6. Tyto součásti zajišťují správnou funkci světlometu jako je: směr světelného kuželu a intenzita osvětlení. V dnešní době jsou hlavně u levnějších modelů nejčastěji používány halogenové žárovky. U dražších variant jsou využívány LED čipy anebo moderní lasery.



a)



b)

Obr. 1.1 Halogenový automobilový světlomet (a – Přední strana, b – Zadní strana)

1.2. Druhy světelných zdrojů

Halogenové žárovky byly využívány od poloviny 60. let minulého století. V dnešní době jsou postupně nahrazovány moderními světelnými zdroji s nižší spotřebou energie, i když své uplatnění si stále drží a to hlavně u modelů nižších tříd. Mezi nejčastěji používané patří LED čipy, xenonové výbojky nebo lasery. Další výhody těchto nových zdrojů jsou větší designová volnost při návrhu světlometů a vysoká životnost.

Halogenové žárovky

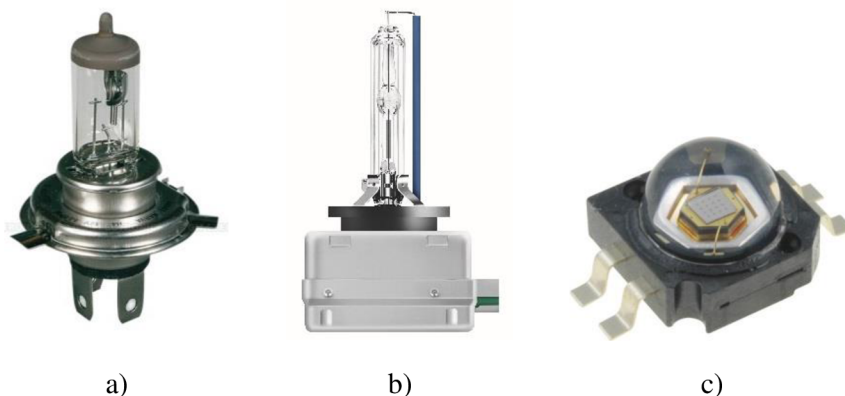
Wolframové vlákno je umístěno v baňce žárovky vyrobené z křemičitého skla. Vnitřní objem baňky je vyplněn plynem s příměsí halogenových prvků (nejčastěji bromid, metylbromid nebo halogen). Průchod elektrického proudu způsobuje rozzáření vlákna žárovky na teplotu chromatičnosti cca 3000 K. Mezi hlavní nevýhody patří vysoká energetická náročnost a nízká životnost, která je způsobena únavovým lomem vlákna v důsledku vibrací vznikajících za provozu vozidla [18].

Výbojky

Světlo vzniká řízeným výbojem v plynném prostředí mezi dvěma elektrodami. Elektrody jsou umístěny ve skleněné trubici, která je vyplněna vzácnými plyny (nejčastěji xenon) nebo parami kovů. Barva světla je dána druhem použitého plynu. U xenonu je barevné spektrum záření blíže spektru denního světla. Teplota chromatičnosti je cca 4100 K. Hlavní výhody jsou až čtyřnásobný světelný výkon (xenon 3200lm/35W, žárovka H7 1500lm/55W) při stejném elektrickém příkonu v porovnání s halogenovými žárovkami a dlouhá životnost [18].

LED čipy

Světlo emitující diody neboli LED jsou polovodičové prvky s P-N přechodem, které po průchodu elektrického proudu propustným směrem emitují světelné záření. Barevná teplota vyzařovaného spektra je cca 6100 K. Mezi výhody této technologie patří velice kompaktní rozměry, nízký elektrický příkon, stálost barevného spektra, nejrychlejší náběh na plný světelný výkon, vysoká měrná světelná účinnost až 100 lm W^{-1} a životnost čipu. Nevýhodou jsou velké nároky na chlazení čipu. Svítivost a životnost jsou závislé na teplotě patice čipu [18].



Obr. 1.2 Druhy světelných zdrojů (a – Halogenová žárovka [21], b – Xenonová výbojka [22], c – LED čip [23])

1.3. Typy světlometů a moderní systémy osvětlení

Povrch reflektoru musí mít vysokou reflektanci (odrazí cca 95 % energie ve viditelném spektru, která na něj dopadne [24]), aby zajišťoval odraz světla vyzařující ze světelného zdroje. Toho je docíleno nanesením tenké vrstvy hliníkových částic pomocí vakuového napařování. Tenká kovová vrstva má oproti plastům vysokou tepelnou vodivost, proto zároveň pomáhá snížit teploty v blízkosti světelného zdroje [25].

Parabolické světlometry

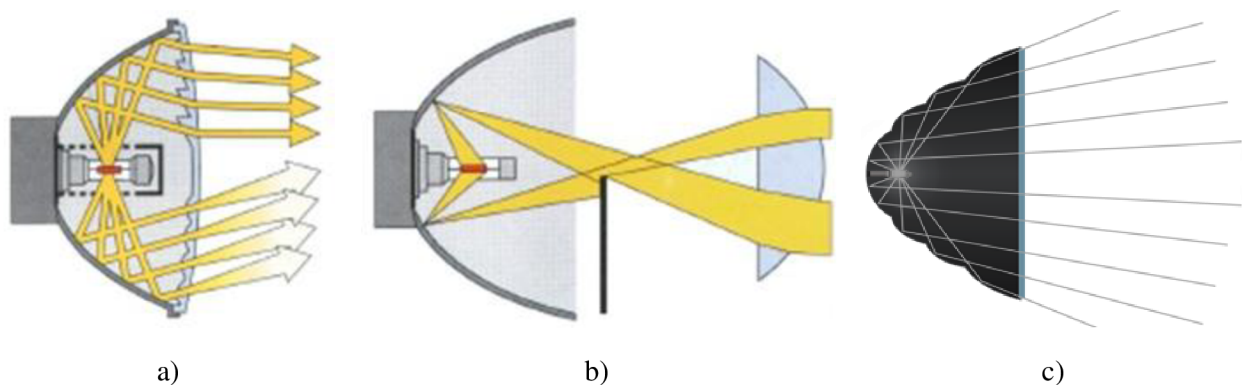
Konstrukčně nejstarší provedení reflektoru. Odrazová plocha je tvořena rotačním paraboloidem, jenž vznikne rotací paraboly kolem své osy. Jsou tvořeny jedním ohniskem, které ovlivňuje průběh světelného kužele [20].

Elipsoidní světlometry

Tvar reflektorové plochy je tvořen trojrozměrným elipsoidem. Výhodou je kompaktní geometrie a vysoký světelný výkon. Tato konstrukce má dvě ohniska, čočku pro usměrnění světelného výkonu a clonu, která vytváří ostřejší přechod mezi světlem a tmou [20]. Změna funkce z dálkové na potkávací je tvořena ořezem výstupního světelného kužele clonou.

Světlometry s volnými odrazovými plochami

Nejnovějším trendem jsou světlometry s volnou odrazovou plochou vytvořenou v prostoru. Tato plocha je složena ze segmentů (fazet), které jsou vytvořeny pomocí numerických modelů, tak aby odražený paprsek světla nasměrovali na požadované místo na vozovce. Největší uplatnění je u modelů nižší třídy [20].



Obr. 1.3 Konstrukční provedení reflektorů (a – Parabolický reflektor [26], b – Elipsoidní reflektor [26], c – Segmentový reflektor [27])

Bi-xenonový s projekční jednotkou

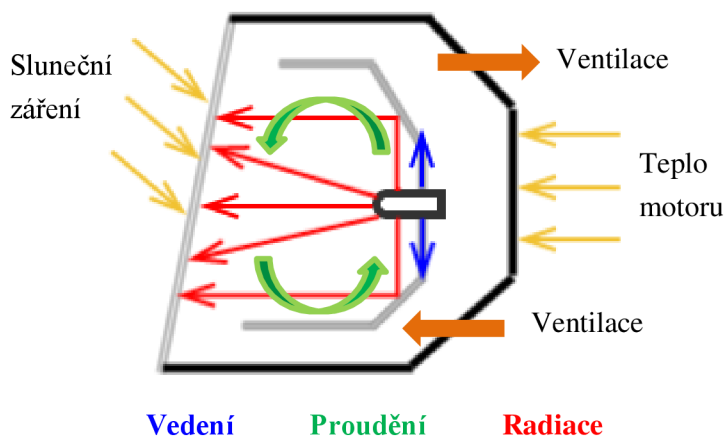
Řešení dovoluje s využitím jedné výbojky, která je napevno zabudována, vytvářet tlumené i dálkové světlo. Pro přepínání mezi těmito dvěma režimy slouží clona, která je ovládána elektromagneticky a změnou polohy zastíní nebo naopak odkryje světelný zdroj před čočkou [20].

Adaptivní světlometry

Světlometry mohou přizpůsobovat světelný výkon proměnným podmínkám provozu. Je možno měnit směr světelného kužele a to jak v horizontálním, tak i ve vertikálním směru. Vozidlo musí být vybaveno elektronickou jednotkou, která shromažďuje údaje ze senzorů a následně je vyhodnocuje. Během jízdy je snímána okolní intenzita světla, úhel natočení volantu, rychlost vozidla, zapnutí směrových světel atd. [20].

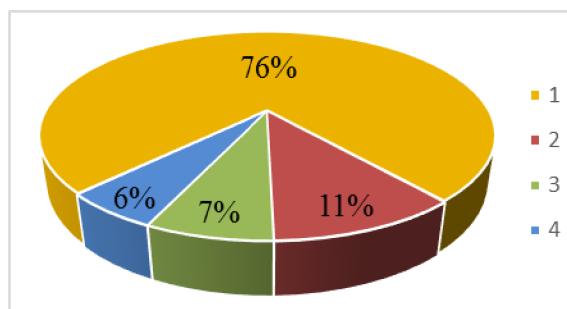
1.4. Druhy přenosu tepla

Dominantní přenos tepla při zapnutém světelném zdroji je radiací (viz obr. 1.5) při použití např. halogenových žárovek [28]. Jednotlivé typy transportu tepla a interakce s okolím světloometu jsou znázorněny na obr. 1.4.



Obr. 1.4 Tepelné interakce světloometu s okolím

Na obr. 1.5 jsou popsány jednotlivé tepelné poměry pro žárovku H1 s příkonem 55 W. Dominantní podíl 87 % příkonu má záření emitováno vláknem žárovky, které je složen z tepelného záření 42 W (na obr. 1.5 oblast 1) a záření ve viditelném spektru 6 W (na obr. 1.5, oblast 2). Zbýlých 13 % příkonu připadá na konvekci vzniklou kolem baňky žárovky 4 W (na obr. 1.5, oblast 3) a vedení tepla přes patičku 3 W (na obr. 1.5, oblast 4) [28]. Moderní světelné zdroje (LED, Xenonové výbojky) vyzařují minimální množství energie radiací. Proto dochází k předávání tepla do okolních komponent pouze vlivem vedení v blízkém okolí a konvencí.



Obr. 1.5 Tepelné poměry pro H1 halogenovou žárovku (1 – tepelný tok, 2 – světlo, 3 – konvekce kolem žárovky, 4 – vedení patičky)

Vedení (kondukcce)

Neboli též tepelná difuze [29]. Je přenos energie pohybem částic (molekuly pro plyny a kapaliny nebo atomy pro tuhé látky). Teplo samovolně proudí od částic s vyšší energií k částicím s nižší energií [29]. Rychlost vedení tepla matematicky popisuje Fourierův zákon – viz rovnice (1.1). Platí zde druhý zákon termodynamiky. Přenos tepla vedením je dominantní v tuhých látkách a tekutinách, které jsou v klidu [29].

Obecná rovnice prvního Fourierova zákona

Je parciální diferenciální rovnice prvního řádu.

$$\dot{q} = -\lambda \nabla T = -\lambda \left(\vec{i} \frac{\partial T}{\partial x} + \vec{j} \frac{\partial T}{\partial y} + \vec{k} \frac{\partial T}{\partial z} \right), \quad (1.1)$$

kde \dot{q} je hustota tepelného toku, ∇T je teplotní gradient, λ je součinitel tepelné vodivosti, $\frac{\partial T}{\partial x}$, $\frac{\partial T}{\partial y}$ a $\frac{\partial T}{\partial z}$ jsou teplotní gradienty v příslušných směrech, \vec{i} , \vec{j} a \vec{k} jsou jednotkové vektory ležící v osách x , y a z .

Proudění (konvekce)

V tekutinách (kapaliny a plyny) je přenos energie mezi částicemi doprovázen přemísťováním hmotnosti látky v prostoru [30], [29].

Rozlišujeme dva hlavní druhy:

- Přirozená – Uvažujme horký objekt vystaven chladnému vzduchu, pak jeho povrchová teplota klesne v důsledku předání tepla do okolního vzduchu a kolem vznikne tenká vrstva teplého vzduchu. Důsledkem vyšší teploty klesne hustota a vzduch začne vstoupat vzhůru [29].
- Nucená – Pokud je proudění kolem horkého objektu neutvořeno přirozeně (jak bylo popsáno výše), ale je vytvořeno za pomoci externího zdroje (např. ventilátor u plynů nebo čerpadlem u tekutin) [29].
- Jejich kombinace

Matematicky je konvekce popsána pomocí Newtonova ochlazovacího zákona – viz rovnice (1.2).

$$\dot{q} = h (T_S - T_{ok}), \quad (1.2)$$

kde \dot{q} je hustota tepelného toku, h je součinitel přestupu tepla, T_S je teplota povrchu, T_{ok} je teplota okolí.

Podobnostní čísla použitá pro popis přirozené konvekce

Grashofovo číslo udává poměr mezi vztlačovými a viskózními silami. Používá se pro přirozenou konvekci [30].

$$Gr = \frac{g \gamma (T_S - T_{ok}) L^3}{\nu^2}, \quad (1.3)$$

kde g je gravitační zrychlení, γ je teplotní součinitel objemové roztažnosti, T_S je teplota chlazeného povrchu, T_{ok} je teplota okolí, L je charakteristický rozměr (výška stěny), ν je kinematická viskozita.

Prandtlovo číslo je poměr kinematické a teplotní difuzivity.

$$Pr = \frac{c_p \cdot \mu}{\lambda}, \quad (1.4)$$

kde c_p je měrná tepelná kapacita za konstantního tlaku, μ je dynamická viskozita, λ je součinitel tepelné vodivosti.

Nusseltovo číslo charakterizuje závislost mezi intenzitou přestupu tepla a teplotním polem v mezní vrstvě proudu tekutiny.

$$\overline{Nu} = \frac{h \cdot L}{\lambda_f}, \quad (1.5)$$

kde h je součinitel přestupu tepla, L je charakteristický rozměr (výška stěny), λ_f je součinitel tepelné vodivosti vzduchu.

Záření (radiace)

U předchozích dvou typů přenosů tepla (vedení a proudění) bylo zapotřebí tzv. zprostředkující médium. Záření je však zcela odlišným mechanismem přenosu tepla, kdy teplo může být přeneseno z jednoho místa na druhé, aniž by muselo být přítomno zprostředkující médium. Je tudíž možno zprostředkovat přenos tepla i ve vakuu [30], [29], [31]. Mechanismus, který tohoto umožňuje je elektromagnetické záření ve formě vln s příčnou vibrací vzhledem ke směru jejich šíření. Svůj původ má v přívodu energie nebo vybuzení (excitaci) částic. Návrat této částice do nižší energetické hladiny je provázen emisí fotonu zářením. Excitační proces může být odlišný a podle jeho výsledku je vysílaná energie označována jako fosforescence, fluorescence, chemická luminiscence, rentgenové záření, rádiové vlny atd. [32]. Bez ohledu na druh záření je rychlost šíření rovna rychlosti světla v daném prostředí (pro vakuum je přesně definovaná hodnota $299\,792\,458\text{ m s}^{-1}$) [29]. Nejdůležitějším druhem záření je z pohledu dominantního přenosu tepla ve světlometech infračervené záření (viz obr. 1.5) [28], [33].

$$\dot{q} = \varepsilon \sigma T_s^4, \quad (1.6)$$

kde \dot{q} je hustota tepelného toku, σ je Stefan-Boltzmannova konstanta ($\sigma = 5,670373e10^{-8}\text{ W m}^{-2}\text{K}^{-4}$), ε je poměrná zářivost šedého tělesa (emisivita) a nabývá hodnot $\varepsilon \in \langle 0; 1 \rangle$, T_s je teplota povrchu tělesa.

Intenzita tepelného záření je závislá na určitém exponentu teploty. Pro monochromatické záření se exponent mění od hodnoty jedna pro vysoké teploty a nebo dlouhé vlnové délky, až po nekonečno pro nízké teploty a krátké vlnové délky. Pro dokonale černé těleso se exponent rovná čtyřem [32].

1.5. Měřené parametry světlometů

Pro správné splnění nároků na světelné vlastnosti, životnost a bezpečnost je důležité znát detailně rozložení vnitřních podmínek světlometu. Určení teplot je kritické pro životnost použitých materiálů a správnou funkci použitých světelných zdrojů [34], [35]. Rovněž je důležité znát vlastnosti použitých světelných zdrojů, a jejich tepelné záření.

Výkony světelných zdrojů

V dnešní době ještě není obecně přijatá metodika postupu měření světelných výkonů u LED světel použitých v automobilech. Většinou výrobci uvádí rozsah v lumenech (nebo tzv. bin) pro každý typ LED čipu. Pro konstrukci nových světlometů je nutné znát přesně parametry (a podmínky při, kterých jich bylo dosaženo), aby bylo možno správně zvolit daný typ a docílit požadovaného světelného výkonu [34]. [9], [35].

Existují tři základní metody pro stanovení svítivosti: 2π integrační koule, 4π integrační koule a Goniometr.

Výpočet tepla vznikajícího za provozu LED

Emitované světlo je funkcí elektrického proudu v propustném směru. Pro konstantní proud je teplota spoje na LED čipu ovlivněna pouze teplotou okolí – viz rovnice (1.7) [35].

$$T_{LED} = T_{\infty} + P_Z \cdot R_{TO(LED-\infty)}, \quad (1.7)$$

kde T_{LED} je teplota LED spoje, T_{∞} je teplota okolí, P_Z je teplo produkované elektrickými ztrátami v čipu, $R_{TO(LED-\infty)}$ je tepelný odpor mezi spojením čipu a okolí.

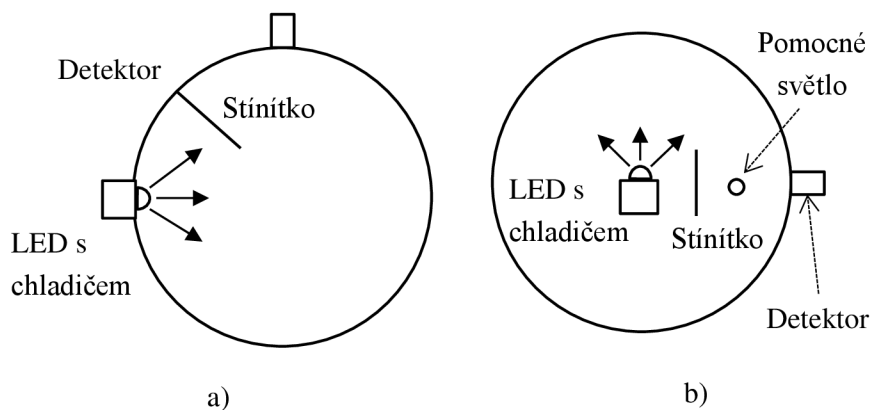
Při zapnutí světla teplota v LED spoji stoupá vlivem elektrických ztrát a s postupem času je stabilizována na $T_{LED} > T_{\infty}$. Jakmile je dosaženo ustáleného stavu, začne proměřování světelného výkonu. Čas potřebný k dosažení ustáleného stavu je závislý na velikosti protékajícího proudu a tepelného odporu použitého chladiče [35]. Ve světlometech je termomanagement LED čipů řízen pomocí deratingu proudu jsoící přes danou funkci, který je při dosažení kritické teploty omezován, čímž je snížen světelný výkon, ale i teplotní zatížení.

Metoda - 2π integrační koule

Během této metody je LED umístěno ze strany do stěny koule dle obr. 1.6 a), průměr použité koule je 12 cm a měřicím zařízením je luxmetr. Tato metoda je velice citlivá na: průměr měřicí koule, umístění luxmetru, umístění LED a použitý chladič. Stínítko zabraňuje přímému dopadu světelných paprsků na měřič [35].

Metoda - 4π integrační koule

U této metody je umístěn LED s chladičem doprostřed měřené koule dle obr. 1.6 b), použitá koule má průměr 50 cm a měřič je spektrometr. Vnitřní povrch měřicí koule má speciální úpravu, jež rozptyluje dopadající paprsky. Výsledkem tohoto opatření je rovnoměrné rozložení dopadajících paprsků. Mezi měřeními LED čipy jsou rozdíly ve světelném toku, což by vedlo k chybě v naměřených datech. Proto je do měřené koule permanentně umístěn pomocný světelný zdroj, pomocí kterého se měří možné rozdíly. Měření je prováděno spektrometrem, který měří světelný výkon v celém viditelném spektru [35].



Obr. 1.6 Měření svítivosti (a – 2π integrační koule, b – 4π integrační koule)[40]

Metoda – Goniometr

Je to zařízení, které má dvě rotující osy. Umožňuje upevnit světelný zdroj a rotovat s detektorem kolem něj, čímž se proměří intenzita v celém prostoru kolem [35].

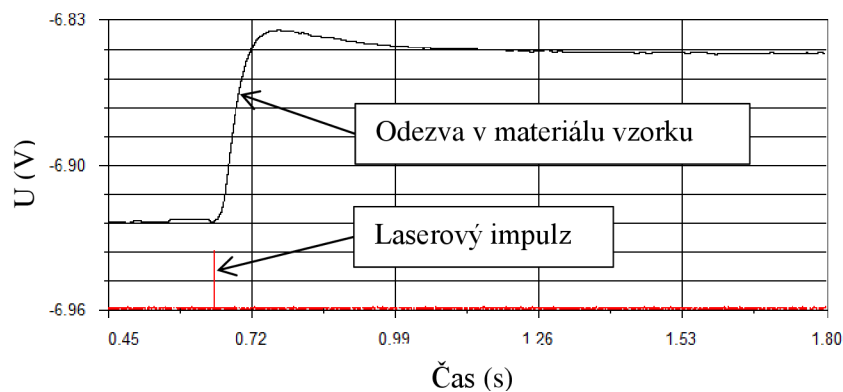
Termofyzikální vlastnosti

Základní termofyzikální vlastnosti materiálu jsou: hustota ρ , součinitel tepelné vodivosti λ a tepelná kapacita c . Pro měření se využívá laserová analýza, metoda hot wire (horkého drátu) nebo metoda hot plate (horký plech) [36].

Laserová analýza

Měření tepelné vodivosti se provádí na vzorku, který je umístěn ve vakuu nebo ochranné atmosféře pece. Měření se provádí pro různé teploty, až po teplotu $1600\text{ }^{\circ}\text{C}$ u přístroji FlashLine 4010. Výsledkem je charakteristika tepelné vodivosti v závislosti na teplotě. Princip měření spočívá ve vyslání energie pomocí laseru, která je při dopadu na měřený povrch přeměněna na tepelnou a pomocí pyrometru je změřena odezva na druhé straně vzorku – viz obr. 1.7.

Tepelná kapacita je měřena obdobně. Opět je proveden energetický výboj laserem, ale nyní je odezva porovnává s referenčním vzorkem o známých termofyzikálních parametrech. Z rozdílu je následně vypočítá absolutní hodnota tepelné kapacity u neznámého vzorku.



Obr. 1.7 Záznam z měření tepelné vodivosti na přístroji FlashLine 4010

Metody – hot plate a hot wire

Jsou základní metody pro zjišťování tepelné vodivosti a nepotřebují speciální vybavení a měřicí techniku, takže jejich výhodou je finanční nenáročnost [37].

Metoda hot plate – mezi dva stejné vzorky je umístěno topné těleso se známým tepelným tokem a jsou změřeny teploty v obou vzorcích v místech blízko topení a na opačném konci. Z časových prodlev v měřených teplotách je následně určena tepelná vodivost. Při této metodě jde tepelný tok pouze v jednom směru (ve směru od topného tělesa) [37].

Metoda hot wire – do rozříznutého vzorku je umístěn topný drát. Na rozdíl od předchozí metody je tato složitější, protože šíření tepla je všech směrech kolem topného drátu [37].

Emisivity povrchů

Pro určování emisivity je možné využít několik technik. Mezi nejpoužívanější techniky patří infračervená spektrometrie, termografie atd. Infračervená spektrometrie je technika, která měří pohlcení infračerveného záření o různé vlnové délce analyzovaným materiálem. Pro měření emisivity touto metodou jsou využívány dva typy měřících zařízení: disperzní spektrometr a FTIR (infračervený spektrometr s Fourierovou transformací) spektrometr. Jelikož jsou tato zařízení jen těžko dostupná, je nutné zajistit uvedené spektrometry v dostatečném časovém předstihu. Rovněž finanční stránka měření není zanedbatelná a klade vysoké požadavky na obsluhu.

Další možností měření emisivity je tzv. termografie. Tato metoda je založena na infračervené termografii, kterou disponují termovizní kamery. Infračervená termografie je založena na zachycení tepla prostřednictvím záření. Tepelná radiace z povrchu tělesa může být emitována z povrchu, odražená od povrchu nebo může povrchem procházet. Teplota povrchu však závisí pouze na složce emitované. Měření této infračervené složky radiace je základem bezkontaktního měření teploty a infračervené termografie. Při této technice určování emisivity jsou srovnávány dva povrchy. Jeden o známé a druhý o neznámé emisivitě. Ze známé emisivity je následně určena hodnota neznámé. Tato metoda však není vhodná pro lesklé povrchy, z důvodu nízké emisivity [24], [38].

Rozložení tepla ve světlotmetech

V posledním desetiletí jsou využívány stále výkonnější a koncentrovanější zdroje světla (LED čipy, xenonové výbojky atd.) [2], [34], proto je důležité vhodně teplotně dimenzovat použité materiály. Výsledky získané za použití numerických simulací vytvořených v komerčních softwarech (např. ANYS, COMSOL atd.) jsou použity pro kontrolu navrženého designu během procesu vývoje od prototypů po konečné fáze vývoje nových světlotmetů [39]. I přes pokročilé možnosti v oblasti numerických simulací, které jsou dnes k dispozici, je nezbytné verifikovat vypočtené výsledky za pomoci experimentů [40]. Je nutné zjistit teploty v kritických místech a určit možnou odchylku výsledků simulací od reálného stavu [17].

Měření teplot je ve vývoji světlotmetů základní a často používaný nástroj pro kontrolu prvotních návrhů konstrukce a celkového designu prototypů [41]. Je nezbytné posoudit nároky na tepelné zatížení pro různé materiály jednotlivých komponentů, proto jsou data získaná z těchto měření využívána konstruktéry k vyhodnocení vhodnosti použitých materiálů ve světlotmetech [24].

Měření teplot je prováděno kontaktně (termočlánky, termistory atd.) nebo bezkontaktně (infrakamery, pyrometry atd.). Pro měření teplot světlometů je nejčastěji využíváno kontaktní měření pomocí drátové termočlánky [19], [41], [42].

Měření pomocí infrakamery

Je velice rychlé, není nutné měřený objekt nijak zvlášť upravovat a dokáže zachytit rozložení teplot přes celý snímaný objekt (rozlišení závisí na použitém čipu). Bohužel tento přístup má své limity a to jsou: nutnost znát přesnou emisivitu měřených povrchů, mít vizuálně volný přístup k měřeným částem, to ovšem může být u světlometů problém z hlediska tvarové různorodosti, výskyt vzdušné vlhkosti může vést ke zkreslení naměřených hodnot a nakonec infrakamera není vhodná k měření lesklých povrchů (reflektor, okrasný rámeček atd.) z důvodu nízké emisivity [24], [42].

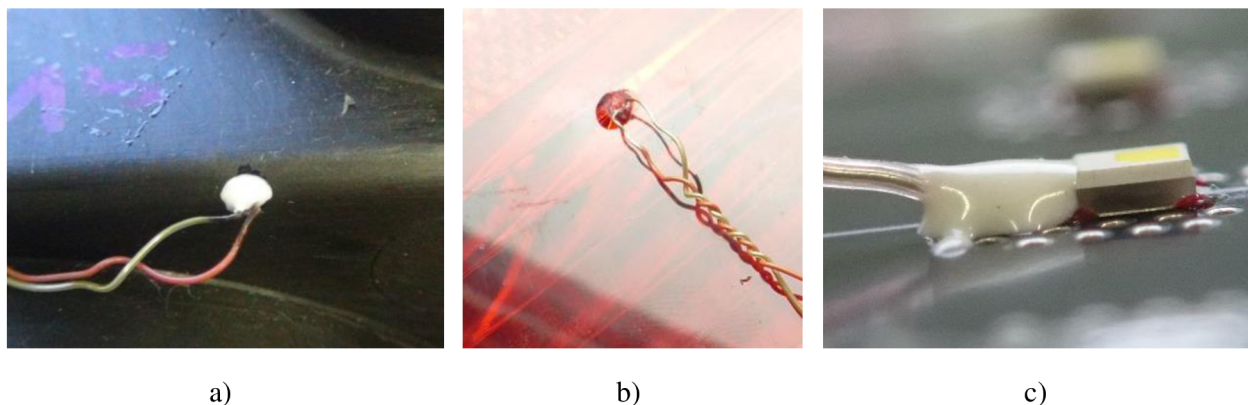
Měření pomocí termočlánků

Termočlánky pracují na principu termoelektrického jevu (Peltier-Seebeckův jev), tj. na převodu tepelné energie na elektrickou. Obvod termočlánku je tvořen dvěma vodiči z různých materiálů, které jsou spojeny ve dvou místech. Spoj T_1 je měřicí spoj a T_2 je studený spoj (slouží pro měření teploty okolí). Teplotní rozdíl těchto spojů generuje v obvodu elektrické napětí, které je zaznamenáno a následně přepočítáno na teplotu podle závislosti výstupního napětí [43].

Mezi nejčastěji používané termočlánky pro měření světlometů patří typ K, který je tvořen z chromelu (Nikl s 10 % chromu) a alumelu (Nikl s 5 % hliníku a křemíku) [17], [24], [41]. Nejvhodnější jsou termočlánky drátové svařované s malým průměrem drátů, aby byl minimalizován odvod tepla z měřeného místa, jak popisuje vzorec (1.8) [41]. Do kritických míst na světlometu jsou vyvrtány malé díry, do kterých je vložen měřicí spoj. Termočlánek je poté upevněn ve své pozici lepidlem nebo epoxidem, které má stejné tepelné vlastnosti jako okolní materiál. Pokud je měřicí bod umístěn do transparentních materiálů je nutné použít lepidlo, které bude mít rovněž stejné optické vlastnosti [17] – viz obr. 1.8.

$$\dot{Q} = \sqrt{UC\lambda A} \cdot \Delta t, \quad (1.8)$$

kde \dot{Q} je teplo odvedené termočlánkem z místa měření, C je obvod vodiče, U je efektivní hodnota součinitele tepelné vodivosti, λ je součinitel tepelné vodivosti, Δt je rozdíl teplot mezi měřeným bodem a teplotou okolí.



Obr. 1.8 Příklady zabudovávání (a – Normální povrch, b – Transparentní povrch, c – LED čip)

1.6. Odmlžení a zamlžení světlometů

Hlavním příčinou tvorby kondenzace v automobilových světlometech je prudký pokles teploty, který způsobí nárůst relativní vlhkosti vzduchu anebo dojde-li k uvolňování vlhkosti z polymerů světlometu [44], [45]. V dnešní době jsou pro výrobu používány výhradně plasty, které pojmu jen minimum vzdušné vlhkosti.

Absorpce a uvolňování vzdušné vlhkosti polymery

Plasty vystavené vzdušné vlhkosti mohou tuto vlhkost absorbovat. Jaké množství pohltí záleží na: typu plastu, relativní vlhkosti vzduchu, teplotě a dalších faktorech. Vlhkost je hromaděna na povrchu plastů a u některých typů může dojít k její absorpci dovnitř materiálu. Z hlediska absorpce vlhkosti jsou polymery rozděleny na navlhavé a nenavlhavé [46].

Nenavlhavé (nehygroskopické) polymery:

Materiály, které nemají schopnost absorbovat vlhkost.

Navlhavé (hygroskopické) polymery:

Nejvíce absorbují vodu polární plasty s hydrofilními skupinami v makromolekule (-OH, -COOH, -NH, -O-) podmiňující absorpci vody. Molekuly vody jsou vázány kapilárními silami v celém objemu (v mikrokapilárách), pokud jsou tyto polymery vystaveny vzdušné vlhkosti. V tomto případě je odpařování ztíženo, protože voda v kapilárách je pod vyšším tlakem a pro sušení musí být použito vyšší teploty, než je bod varu při p_{atm} . Absorpce vlhkosti přestane v momentě, kdy je koncentrace uvnitř vyrovnána s okolím vzduchem. I mezi těmito polymery jsou rozdíly v čase, který je zapotřebí k dosažení stavu nasycení vlhkosti, nebo v maximálním množství absorbované vody [46].

Hlavní faktory, které se podílí na tomto jevu:

- Typ polymeru
- Doba, po kterou byl polymer vystaven atmosférickému vzduchu
- Množství vzdušné vlhkosti
- Teplota

Naopak vysušování hydrogroskopických plastů je závislé na:

- Teplotě plastu
- Relativní vlhkosti/ rosném bodu okolního vzduchu
- Proudění vzduchu

Teplota polymeru – je nejdůležitější faktor pro vysoušení. Má velký vliv na rychlost difúze molekul vody přes hydrogroskopický polymer, takže rychlost ztráty vlhkosti je do značné míry závislá na teplotě polymeru. Při zvýšení teploty polymeru dojde k zintenzivnění pohybu molekul a přitažlivost mezi polymerními řetězci a molekulami vody je značně snížena, což umožní uvolňování vlhkosti z polymerních řetězců [46].

Relativní vlhkost/ rosný bod – pro dosažení nižší úrovně vlhkosti, musí být polymer vystaven prostředí se suchým vzduchem. Tedy relativní vlhkost a rosný bod tvoří druhý základní parametr sušení [46].

V Tab. 1.1 jsou uvedeny běžně používané polymery při výrobě světlometů. Jsou v ní uvedeny absorpční vlastnosti a maximální hodnota nasycení vodou pro každý druh. Udávané hodnoty nasycení byly stanoveny pomocí testu, při kterém byl plast ponořen na 24 h do vody.

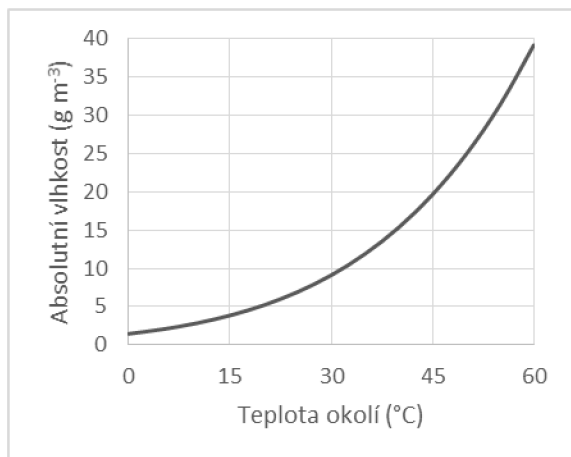
Tab. 1.1 Plasty používané při výrobě automobilových světlometů [46]

| Druh polymeru | Hustota (g·cm ⁻³) | Max. nasycení (%) |
|---------------|-------------------------------|-------------------|
| ABS | 1,18 | 0,1 |
| ASA | 1,07 | 0,25 |
| PC | 1,2 | 0,15 |
| PEI | 1,27 | 0,25 |
| PET | 1,56 | 0,1 |
| PMMA | 1,19 | 0,3 |
| PP | 0,9 | 0,02 |

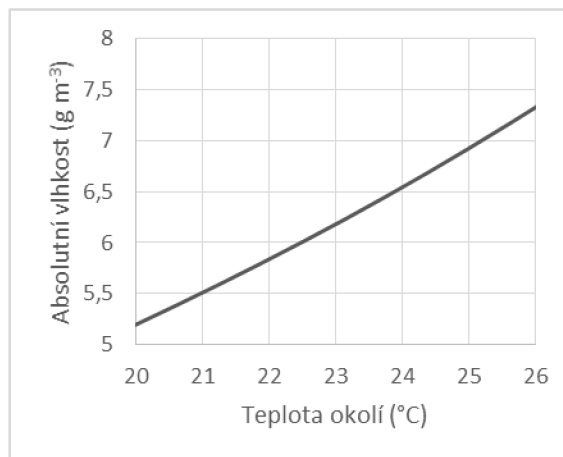
Příklad porovnání množství vlhkosti ve vzduchu a v plastech světlometu

Typický světlomet má vnitřní objem kolem 10000 cm³ a 5000 g plastu. Při podmínkách: teplota okolí 23 °C, relativní vlhkost 30 % a tlak okolí 1 atm (101325 Pa). Množství vlhkosti obsažené ve vzduchu lze zjistit pomocí následujícího obr. 1.9. Absolutní vlhkost je cca 6,2 g m⁻³, pokud tuto hodnotu přepočítáme na vnitřní objem světlometu, dostaneme 0,062 g vody.

Plasty používané při konstrukci světlometu (viz tab. 1.1) dokáží pojmout maximálně cca 0,15 % (údaj je pro 100 % RH) vody ze své hmotnosti, což pro typickou hmotnost 5000 g je 7,5 g vody. Pro zvolenou relativní vlhkost 30 % je výsledné množství vody v plastech 2,25 g.



a)

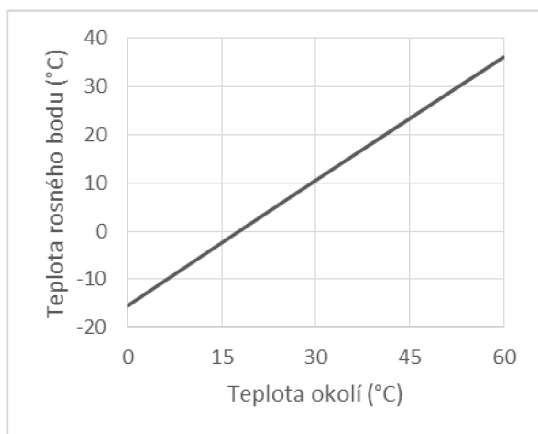


b)

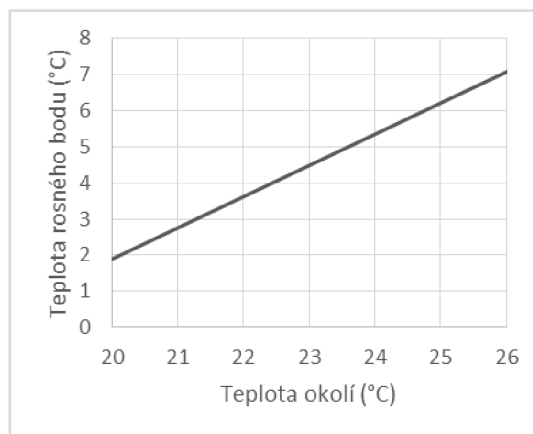
Obr. 1.9 Absolutní vlhkost pro tlak okolí 1 atm a relativní vlhkost 30 % (a – Větší rozsah teplot, b – Detail křivky v blízkosti teploty 23°C)

Pokles teploty okolí

Při výrazném poklesu okolní teploty (pod rosný bod) bude vzduch následkem izobarického ochlazení nasycený, aniž by mu byla dodána vodní pára z vnějšku. To znamená, že relativní vlhkost je z nominálního stavu zvýšena na 100 % a pokud teplota nadále klesá, začne na studených površích kondenzovat přebytečná vlhkost ve formě vodních kapiček (vodního filmu). U světlometu vlivem malé výměny vnitřního média s okolím dochází k tomuto jevu hlavně v oblasti předního skla (vlivem ochlazování za jízdy). Časově nejnáročnější je odmlžení předního skla v oblasti rohů, kde je proudění velice omezeno, a proto zde dochází k lokálnímu zvýšení relativní vlhkosti.



a)



b)

Obr. 1.10 Teplota rosného bodu, pro tlak okolí 1 atm a relativní vlhkost 30 % (a – Větší rozsah teplot, b – Detail křivky v blízkosti teploty 23°C)

1.7. Přehled stávající situace testování odmlžení

Tato kapitola popisuje stávající stavu řešení problematiky testování předních světlometů na odmlžení používaných výrobci a automobilkami. Porovnáním jednotlivých přístupů a určením jejich výhod a nevýhod.

Historie testování předních světlometů na odmlžení sahá na počátek 90. let, kdy byl poprvé představen nový design předních skel světlometů, který byl vyroben z transparentních plastů - viz obr. 1.11 b). První krok při tvorbě standartního postupu odmlžovacích testů bylo zavedení kritérií na základě již existujících způsobů testování. Během těchto prvních testů nesměly být uvnitř světlometu kapky vody. Byly testovány pouze klimatické podmínky nejkritičtější pro vznik kondenzátu uvnitř (simulace podmínek tropického deště a mrazivé počasí). Cílem těchto testů bylo pouze zjištění nedostatků těsnění světlometu a nikoliv optimalizace proudění vzduchu uvnitř světla. Simulace tropického deště byla prováděna při teplotě okolí vyšší než 24 °C, což bylo velmi daleko od typických klimatických podmínek nutných pro tvorbu kondenzátu uvnitř světla. Trvalo roky, než bylo lépe porozuměno fenoménu kondenzace a výrobci světel přišli s konstrukčními opatřeními, jež zabraňují nebo alespoň dokáží omezit tento nepříjemný efekt. Hlavní inovací byly vhodné rozmístěné ventilační otvory, hydrofobní membrány a povlaky zabraňující tvorbě kondenzátu [15].

První testy byly prováděny v provozu. Během těchto testů byly ukázány veškeré interakce, které jsou schopny příznivě i nepříznivě ovlivnit tvorbu kondenzátu. Například interakce motorových součástí se světlometem, vliv rychlosti vozidla, režim svícení, teplota a vlhkost vzduchu. Hlavní nevýhodou ovšem byla špatná reprodukovatelnost výsledků, vzhledem k velice proměnným podmínkám během testu. Proto výrobci světlometů začali využívat testy ve větrných tunelech s modely v reálné velikosti (1:1) nebo s prototypy automobilů, kdy je možno kontrolovat klíčové faktory nutné pro tvorbu zamlžení (teplota a vlhkost vzduchu, rychlost proudění). Nevýhoda je ovšem v cenové náročnosti takto prováděných měření, proto je zde testováno pouze malé množství z celkového počtu prototypových světlometů. Bylo tedy nutné nalézt jiné řešení, které by dovolilo snížit náklady a umožnilo výzkum fyzikálních procesů tvorby parní vrstvy [15].



a)



b)

Obr. 1.11 Design přední části světlometů (a – Původní vyroben ze skla, b – Současný vyroben z transparentních plastů) [15]

Testovací procedury

Pro testování se používají speciální prostory: zkušebny a větrné tunely [7], [47], ve kterých je možno nastavit a kontrolovat nejrůznější parametry (teplotu okolí, relativní vlhkost, rychlost proudění vzduchu) a simulovat nejrůznější nepříznivé klimatické scénáře, které mohou nastat při provozu světel [15].

Další způsob testování jsou provozní zkoušky. Reálný automobil je osazen testovaným světlometem a je provedena zkušební jízda. Tyto jízdy trvají v řádu desítek minut, až několik desítek hodin [8], proto může dojít ke změnám klimatických podmínek (teplota a vlhkost vzduchu), ale i ke změně podmínek na pozemních komunikacích [8], [28].

Testování v kontrolovaném prostředí

Dosud není přesně stanovena testovací procedura pro odmlžení světlometů, proto každý výrobce světel a výzkumné pracoviště má své interní postupy. Například autoři: Alberto Deponti, Fabio Damiani, a kolektiv [15], popisují ve svém článku testovací proceduru a její hlavní části. Testování na odmlžení je prováděno v místnosti speciálně zkonstruované pro tyto účely – viz obr. 1.12 a), do které je umístěn model karoserie se zabudovaným světlometem – viz obr. 1.12 b). U modelu je reprodukován tvar karoserie kolem světel kvůli dosažení reálného proudění vzduchu a tím pádem i dosažení reálných hodnot parametrů součinitele přestupu tepla.



a)



b)

Obr. 1.12 Testování odmlžení (a – Zkušebna, b – Model automobilu v reálné velikosti) [15]

Motorový prostor je zohledněn u modelu kvůli vytvoření totožného proudění z vnitřní strany světlometu. Zkušebna má vnitřní objem 30 m^3 s okny pro kontrolu experimentu zkušebním technikem. Možnost ovládání (měnění) parametrů ovlivňujících tvorbu kondenzátu ve světle, jako jsou: rozložení součinitele přestupu tepla α na stěnách světa, relativní vlhkost a teplota vzduchu, rychlost proudění vzduchu (až do 80 km h^{-1}), tlak vzduchu v blízkosti ventilačních otvorů světa. Dále se dá ovlivnit interakci motorového prostoru se světlometem (změnou průměrné teploty produkované motorovým prostorem) a simulovat proudění vzduchu s reálnými teplotami v motorovém prostoru [15]. Z průběhu měření byly naměřena data a pořízeny fotografie s ústupem kondenzátu předního skla. Výsledky experimentů byly použity pro tvorbu a verifikaci následných numerických simulací (program ANSYS). Na výsledné rozložení zamlžené oblasti mají silný vliv počáteční

a okrajové podmínky, které ukazují komplexnost dějů podílejících se na tomto fenoménu. Je potřeba kontrolovat a udržovat podmínky během celého experimentu stabilní [15].

Švédská společnost SAAB provádí testování světlometů ve větrném tunelu, kde je umístěn celý automobil a testován v různých klimatických podmínkách a jízdních režimech. Test začíná v režimu, kdy má motor volnoběžné otáčky a v tunelu je spuštěna simulace studeného deště. Poté jede automobil vysokou rychlostí (jízda po dálnici). Celý test trvá přibližně pět a půl hodiny. Teploty jsou zaznamenány uvnitř i vně světlometu. Teplota uvnitř světlometu je měřena blízko vnitřní strany předního skla. Rovněž je měřena relativní vlhkost uvnitř, ze které je vypočítána teplota rosného bodu. Postup kondenzace na vnitřní straně skla světlometu je monitorován pomocí fotografií [3].

Německá společnost BMW využívá pro testování dvojitou klimatickou komoru (model Heraus-Voetsch VUK 04/300), která umožňuje nastavení teploty a relativní vlhkosti. Jedna část komory slouží pro nastavení parametru vzduchu kolem světlometu a druhá pro simulaci vlivu motorového prostoru za světlometem. Proto je možno simulovat interakci mezi motorem a světlometem a rovněž některé klimatické scénáře. Extrémní typy počasí (bouřka, sněžení atd.) jsou reprezentovány při testování pomocí speciálních tří kondenzačních cyklů, které následují po sobě. Celý test pak trvá zhruba sedm a půl hodiny. Během testu jsou sledovány teploty a relativní vlhkosti v kontrolních místech a výsledné hodnoty jsou porovnány mezi sebou. Lze rovněž určit, zda mají úpravy (změna pozic odvětrávacích otvorů, nanesení proti zamlžovací vrstvy na vnitřní straně předního skla, přidání ventilační trubky na odvětrávací otvory) světlometu příznivý efekt na snížení množství a četnosti kondenzace na předním skle [13].

Testování pomocí provozních zkoušek

Cílem testování je vytvořit během jízdy typické podmínky. U každého světlometu jsou monitorovány kritická místa, která jsou náchylná k tvorbě kondenzace. Naměřená data jsou posléze použita ke kontrole vizuálních výsledků oblastí s kondenzátem. Testy jsou zaměřeny na proměření krizových jízdních scénářů, které obsahují různé počasí (bouřky, slunečné počasí, mlhu atd.), režim jízdy (parkování, jízda se zapnutými a vypnutými předními světlometry, stání v kolonách, jízdu po dálnici, jízdu po běžných pozemních komunikacích mimo město, ve městě atd.) a speciální situace (mytí automobilu v myčce, ruční mytí, výjezd z teplé garáže v zimním období).

Nejkomplexnější výsledky jsou získány z dlouhodobých testů (denní až několika denní zkoušky), které jsou prováděny v proměnných klimatických podmínkách a v různých ročních obdobích. Tento způsob dlouhodobého testování je vhodný pro přesné výsledky množství kondenzace a její nejčastější výskyt uvnitř světlometu.

Většina plastů používaných při konstrukci světlometu patří mezi hydrokopické polymery (viz kapitola 1.6 Odmlžení a zamlžení světlometů). To znamená, že pohlcují vzdušnou vlhkost a následně ji uvolňují během ohřívání. Při první instalaci světlometu je většinou vidět největší odchylka od běžného chování světlometu na tvorbu kondenzace. To může být zapříčiněno tím, že světlomet byl vyroben v místě, kde bylo teplo a vysoká relativní vlhkost, ale montována byla v místě s chladnější teplotou okolí. Tato okolnost má velký vliv na výslednou úroveň vlhkosti obsažené v plastech světlometu. Dalším příkladem je vystavení světlometu teplu vznikající od motoru a ze světelného zdroje. Proto je nutné pro získání výsledků, které nebudou nadměrně ovlivněny tímto dějem, nechat světlomet alespoň po dobu 24 h otevřený, aby došlo k vyrovnání vzdušné vlhkosti uvnitř a vně světlometu a stejně tak i k vyrovnání vlhkosti obsažené v plastech.

Výsledkem testů je série grafů mapujících provozní podmínky během celého dne (teplotu okolí, teploty uvnitř světlometu, zapnuté/ vypnuté přední světlometry, režim jízdy, druh počasí – déšť, sněžení, mrholení atd.) a na základě naměřených hodnot teplot je vypočítána teplota rosného bodu. Z výsledků jsou určeny problematické okolnosti, popřípadě jejich kombinace a dále jsou tyto výsledky porovnají s fotografickou dokumentací pořizovanou v průběhu celého testovacího cyklu. Pomocí tohoto postupu je určeno, kdy došlo ve světlometu ke kondenzaci a v jakých místech se kondenzát vyskytoval [8].

Způsob tvorby kondenzace ve světlometu

Ve všech této kapitole uvedených případech je kondenzace uvnitř světlometu tvořena na základě nastavení vhodných podmínek v okolí. Testované světlometry je umístěn do klimakomory, která umožňuje nastavení teploty a relativní vlhkosti. Celý proces vždy trvá od několika hodin po několik desítek hodin. Tyto dlouhé časy jsou nutné z důvodu časově náročné absorpce vody plasty. Během samotného experimentu slouží tyto plasty následně jako zásobníky vlhkosti, která je po zahřátí světelného zdroje postupně uvolňována.

Nevýhody použitých postupů

- Celý přípravný proces zamlžování je časově velice náročný (pro laboratorní testování)
- Nutnost mít speciální prostory a vybavení (pro laboratorní testování)
- Testy v reálném provozu mají ve většině případů špatnou opakovatelnost (z důvodu proměnných klimatických podmínek) a jejich výsledky jsou obtížně zopakovány pomocí numerických simulací (z důvodu neznámých a proměnných podmínek během experimentu)
- Testy v reálném provozu mohou být rovněž časově náročné
- Vyhodnocování fotografií s kondenzátem není prováděno automaticky za pomoci softwaru s obrazovou analýzou, ale ve většině případů je prováděna vizuálně, což je časově náročné a nepřesné
- I malá změna podmínek při zamlžování může vést k velmi rozdílnému výsledku (rozložení kondenzátu)

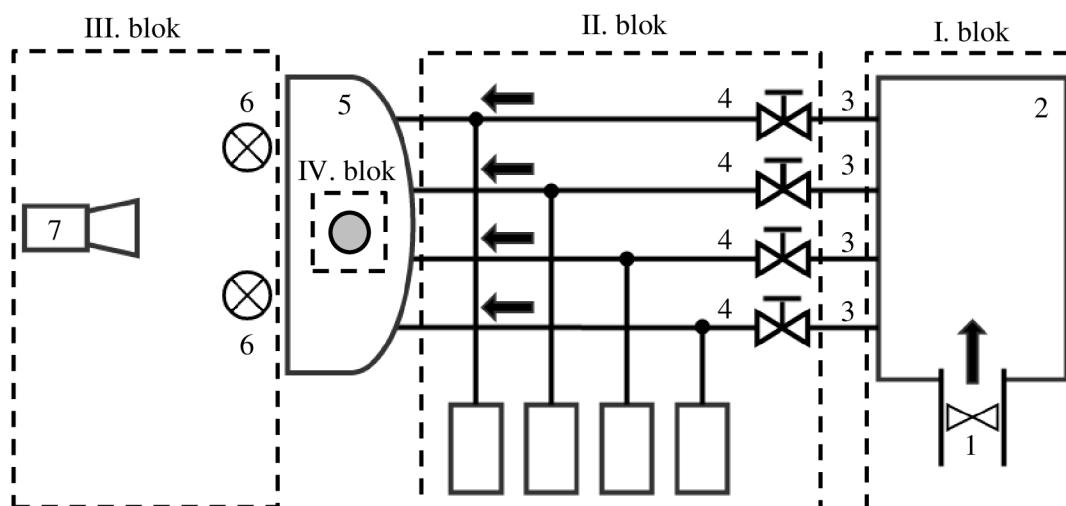
2. PRAKTICKÁ ČÁST

V této kapitole jsou prezentovány a popsány postupy, numerické modely a zařízení vyvinuté autorem práce v Laboratoři přenosu tepla a proudění na VUT v Brně. Jednotlivé oblasti výzkumu byly měření odmlžování předních automobilových světlometů, teplotního zatížení světlometů, měření emisivity a tepelného výkonu halogenových světelných zdrojů. Naměřená data získané z těchto metod byly následně používány společností Škoda Auto a.s. pro testování, ověřování prototypových světlometů a zároveň za účelem verifikace numerických simulací mapujících teplotní zatížení komponentů světlometů nebo k přesnějšímu naladění okrajových a počátečních podmínek.

2.1. Měřicí zařízení pro testování odmlžení světlometů

Jak bylo ukázáno v kapitole 1.7 Přehled stávající situace testování odmlžení, většina testů odmlžování světlometů byla prováděna v klimakomoře. Časová náročnost přípravné části byla i několik dnů a samotné testy trvaly až několik desítek hodin. V rámci tohoto doktorského studia bylo vyvinuto zařízení, které umožňuje rychle, jednoduše a levně testovat automobilové světlometry na odmlžení a možnost jejich porovnání. Na vývoji bylo spolupracováno se společností Škoda Auto a.s. Měřicí zařízení není nutné umísťovat do klimakomory, protože je zamlžení neprováděno pomocí vlhkosti uvolňující se z plastových částí světlometu ani ze vzduchu. Vlhkost byla do světlometu zaváděna pomocí vypařování přesně stanoveného množství vody. K tomuto účelu bylo využíváno speciálně zkonstruované zařízení (viz následující kapitola), které bylo pomocí otvoru vyvrtaného v horní části těla světlometu zasunuto dovnitř. Nastavením přetlaků na jednotlivé ventilační otvory (příčemž jeden otvor byl použit jako výstup) bylo docíleno proudění vzduchu uvnitř, bez nutnosti zapínat světelný zdroj.

Běžně je světlomet na zadní straně vybaven odvětrávacími otvory pro zajištění výměny vzduchu s okolím. Otvory jsou umístěny v místech s největšími rozdíly dynamických tlaků, které vznikají za provozu v motorovém prostoru a spolu s odpadním teplem vznikajícím zapnutím žárovek (LED čipů, xenonových výbojek, atd.) dává tlakový spád pohánějící proudění vzduchu uvnitř světlometu a tím odvod vlhkosti z vnitřního prostoru. Případně je světlomet opatřen nucenou konvekcí přivedením tlakového vzduchu z chladičového prostoru. Pro návrh rozmístění odvětrávacích otvorů provádí výrobci automobilů četné numerické simulace motorového prostoru s cílem naleznout místa s vyšší rychlostí proudění vzduchu [48].



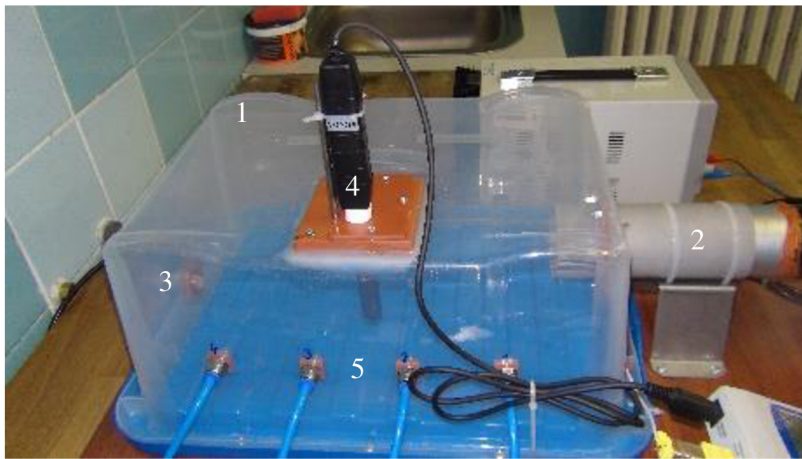
Obr. 2.1 Schéma uspořádání měřicího zařízení (1 ventilátor, 2 vzdušník, 3 rozvody tlakového vzduchu, 4 regulace tlaku, 5 světlomet, 6 osvětlení kondenzátu, 7 fotoaparát)

Měřicí zařízení bylo složeno ze čtyř bloků. První blok slouží jako homogenizátor a zdroj tlakového vzduchu. Byl zde rovněž umístěn teploměr a vlhkoměr pro monitorování parametrů vstupního vzduchu. Druhý blok byl určen k rozvodu a regulaci tlakového vzduchu. Byl tvořen čtyřmi přívodními větvemi pro stlačený vzduch a ke každé větvi byl připojen tlakoměr. Třetí blok sloužil k záznamu postupu odmlžení během experimentu. Byl tvořen kamerou a dvěma zdroji světla na osvětlování světlometu z různých úhlů. Poslední čtvrtý blok sloužil k zamlžení vnitřní strany předního krytu světlometu. Tvořil jej zvlhčovač, který byl před experimentem vsunut do vnitřního prostoru světlometu. Podrobný popis tohoto zařízení je v následující kapitole.



Obr. 2.2 Měřicí zařízení pro odmlžovací testy

První blok sloužil jako zdroj tlakového vzduchu pro jednotlivé přívody do světlometu. Podstatnou součástí zařízení byl vzdušník 1, který rovněž plnil funkci homogenizátoru tlaku s otvory pro přívod vzduchu z ventilátoru 2 a na zadní straně hrubou regulací tlaku 3. Dále byla horní stranou vzdušniku 1 vsunuta ruční sonda (Omega RHXL3SD) 4 pro měření a zaznamenávání relativní vlhkosti a teploty vzduchu přiváděného na jednotlivé odvětrávací otvory. Z levé strany vzdušniku 1 byly vyvedeny čtyři hadice 5, které přivádí vzduch do druhého bloku. Nastavované přetlaky byly velmi nízké v řádech desítek pascalů.



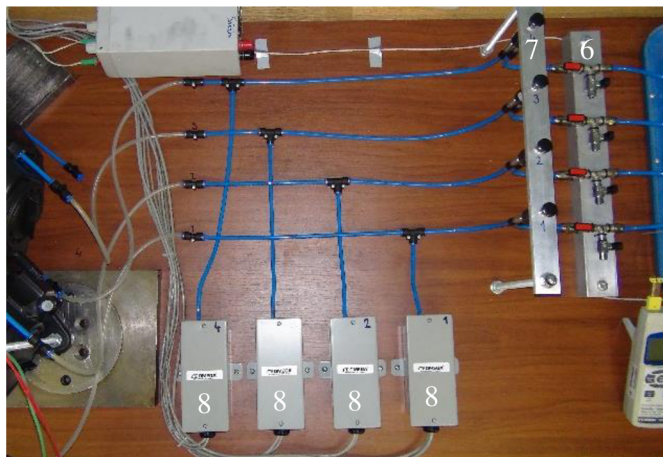
a)



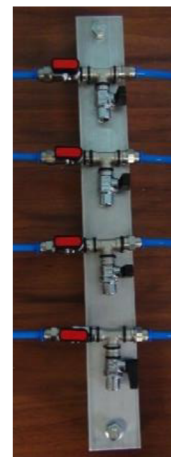
b)

Obr. 2.3 První blok (a – Celkový pohled, b – Detail regulačního kohoutu, 1 vzdušník, 2 ventilátor, 3 hrubou regulací tlaku, 4 vlhkoměr, 5 rozvody tlakového vzduchu)

Druhý blok sloužil pro regulaci a zaznamenávání přetlaků v jednotlivých větvích. Ze vzdušniku 1 byl vzduch přiváděn na první stupeň (hrubé) regulace tlaku 6, kterou tvoří kohouty a dále byl přesně doladěn pomocí membránových ventilů (Omega AR91-005) 7. Každou větev lze nastavovat samostatně a rovněž samostatně zaznamenávat pomocí diferenčních tlakoměrů (Omega PX277-01D5V) 8.



a)



b)



c)

Obr. 2.4 Druhý blok (a – Celkový pohled, b – Hrubá regulace, c – Přesná regulace, 6 kohouty, 7 membránové ventily, 8 diferenční tlakoměry)

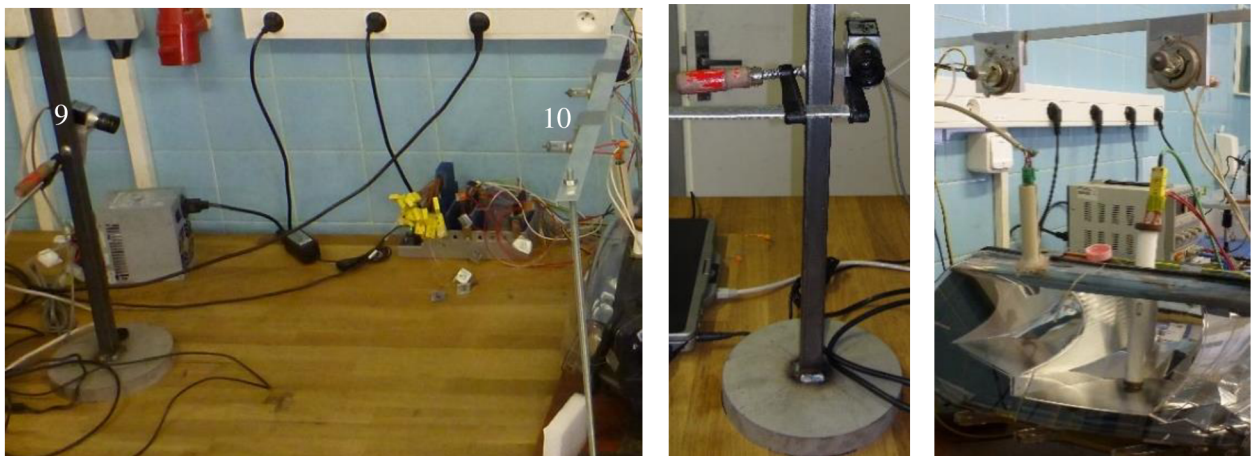
Měřený světlomet byl nejprve upraven pro měření. Z odvětrávacích otvorů byly demontovány gumové labyrinty, které bránily prachovým částicím vnikat do vnitřního prostoru spolu se vzduchem. Na vzniklé otvory byly přilepeny redukce s hadicemi, které propojovaly daný odvětrávací otvor s druhým blokem měřicího zařízení. Dále byl do horní plochy těla světlometu vyvrtán otvor pro zasunutí zvlhčovače (viz následující kapitola) a druhý otvor pro sondu měřící relativní vlhkost a teplotu, která sloužila k monitorování parametrů vzduchu během zamlžování předního skla. Do předního skla byly zabudované termočlánky pro kontrolu správného podchlazení během zamlžování. Dva termočlánky byly umístěny i do reflektoru z důvodu monitorování teplot vnitřních ploch a tím zabránění kondenzace vypařované vody mimo přední sklo.



a) b) c) d)

Obr. 2.5 Úpravy světlometu (a – Osazení předního skla čtyřmi termočlánky, b – Připojení odvětrávacích otvorů, c – Otvor pro zvlhčovač, d – Zabudovaná sonda)

Cílem třetího bloku byl záznam odmlžování předního skla světlometu, proto byl před světlomet umístěna kamera 9 (Basler aca 200 50gc), která byla ovládána pomocí prostředí LabView (viz kapitola 2.6 Program pro ovládání a záznam dat z odmlžovacích testů) a světelné zdroje 10 pro osvětlování kondenzátu. Reflektor světlometu je tvořen lesklými odrazovými plochami pro odraz světla požadovaným směrem, což způsobuje na fotografiích přsvětlená místa, která nelze následně vyhodnotit programem pro automatickou detekci zamřené a odmlžené oblasti (podrobnosti v kapitole 2.3 Automatická detekce kondenzátu z fotografií). Bylo zjištěno, že nejvýhodnější pozice pro eliminaci nežádoucích odrazů od reflektoru je osvětlování seshora pomocí dvou světelných zdrojů. V tomto případě halogenových žárovek H12.



a) b) c)

Obr. 2.6 Třetí blok (a- Celkový pohled, b – Uchycení kamery, c – Pozice žárovek osvětlujících kondenzát, 9 kamera, 10 světelné zdroje)

Poslední část tvořilo speciálně zkonstruované zařízení pro zavádění vlhkosti do vnitřního prostoru světlometu. Takto přidaná vlhkost byla následně zkondenzována na vnitřní straně předního skla světlometu. Bližší popis je v následující kapitole.

Vývoj měřicího zařízení

Zdokumentované vylepšení, které jsou popsány u jednotlivých verzí měřicího zařízení, mají za cíl umožnit snadné zamlžování světlometů, jehož výsledky mohou být použity pro porovnávání rychlosti odmlžování u různých světlometů a zároveň k nastavení počátečních a okrajových podmínek pro numerické simulace.

První (pokusná) verze – do světlometu byl vložen zvlhčovač (viz následující kapitola) se známým množstvím vody, které bylo vypařeno. Ke z kondenzování vody na předním skle bylo použito podchlazeného média. Pro záznam kondenzátu byl použit fotoaparát s bleskem.



Obr. 2.7 Měřicí zařízení pro odmlžovací testy v1.0

- Ze záznamu fotografií bylo zjištěno, že blesk velmi dobře funguje pro nasvícení kondenzátu, který byl dobře zviditelněn na fotografiích.

Druhá verze – Přední sklo testovaného světlometu bylo osazeno termočlánky a k zařízení pro odmlžovací testy byla dodána kamera s žárovkami, která sloužila místo blesku.



Obr. 2.8 Měřicí zařízení pro odmlžovací testy v2.0

- Pro dodržení dostatečně nízké teploty předního skla během zamlžovací fáze experimentu byly termočlánky zabudovány do čtyř různých míst.
- K nosné desce měřicího zařízení byly přišroubovány ocelové držáky pro stabilní upevnění světlometu
- Při vyhodnocování zamlžených a odmlžených částí předního skla pomocí softwaru pro automatickou detekci zamlžené a odmlžené oblasti – viz kapitola 2.3 Automatická detekce kondenzátu z fotografií byl zjištěn problém s osvětlováním kondenzátu. Uvnitř světlometu byl reflektor, který byl složen

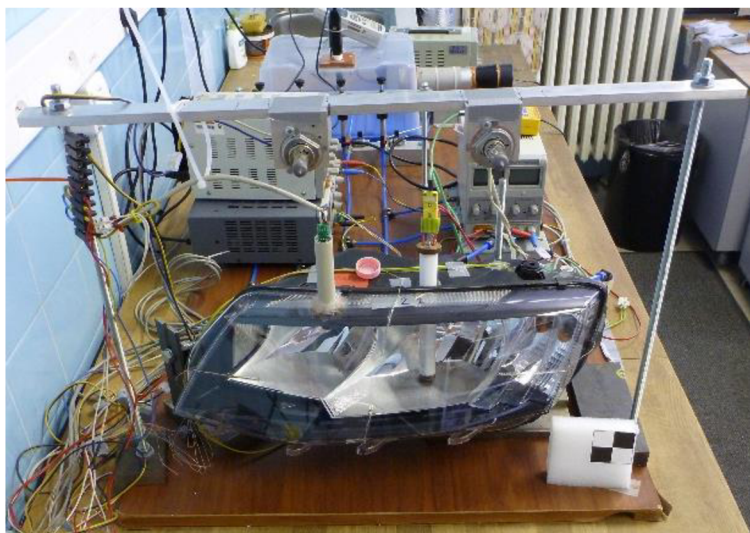
z odrazových ploch. Tyto plochy přesvětlují snímky a mají negativní vliv na následné vyhodnocení pořízených fotografií. Proto bylo přistoupeno k osvětlování pomocí dvoubodového zdroje světla. Každá fotka byla posléze složena ze dvou po sobě jdoucích fotografií. Touto metodou vyhodnocování byly značně sníženy přesvětlené (nevyhodnotitelné) oblasti.

- Do vnitřního prostoru světlometu byl umístěn ventilátor, který během přípravné fáze experimentu (zamlžování) vyrovnal relativní vlhkost v celém vnitřním prostoru a tím bylo dosaženo rovnoměrné tloušťky zkondenzované vrstvy na vnitřní straně předního skla.

Třetí verze – Do testovacího světlometu byl dodán vlhkoměr

- Během procesu zamlžování nebyly známy parametry vzduchu uvnitř světlometu, proto byl testovaný světlomet osazen vlhkoměrem. Monitorování vlhkosti mělo kritický vliv na správné nastavení numerických simulací. Regulací příkonu zvlhčovače ovlivňovala rychlost vypařování, tím bylo sníženo riziko kondenzace mimo plochu předního skla světlometu.

Čtvrtá verze – Monitorování výkonu zvlhčovače a optimalizace polohy osvětlení kondenzátu



Obr. 2.9 Finální měřicí zařízení pro odmlžovací testy v4.0

- Z důvodu přesnějšího nastavení okrajové podmínky v numerických simulacích bylo přidáno zaznamenávání napětí zvlhčovače během fáze zamlžování pomocí LabView, z kterého byl dopočítán příkon topného tělíska a hlavně celkový čas vypařování.
- Osvětlení světlometu bylo umístěno do horní části. Z důvodu omezení odrazů světla směřujícího přímo do fotoaparátu.
- Během přípravné fáze experimentu (zamlžování) nebyl využíván ventilátor, který byl zabudován do vnitřního prostoru světlometu. Výsledky z měření nebylo možno reprodukovat numerickými simulacemi, proto tento přístup s homogenní tloušťkou kondenzátu nebyl dále používán.

S finální verzí měřicího zařízení bylo dosaženo dobré opakovatelnosti naměřených výsledků. Měřená data bylo možno snadno použít jako okrajové a počáteční podmínky v numerických simulacích odmlžování světlometů. Nejdůležitější vylepšení bylo vložení sondy relativní vlhkosti do světlometu, což umožnilo optimální regulaci zvlhčovače a zkondenzování většiny vypařované vody na vnitřní straně

předního skla. Dále změna pozice osvětlování fotografií, čímž byla snížena plocha nevyhodnotitelné oblast při následné obrazové analýze na minimální hodnotu. Poslední bylo odstranění ventilátoru během zamlžovací fáze experimentu, který měl zhomogenizovat tloušťku kondenzátu na předním skle. Ovšem při aplikování konstantní tloušťky kondenzátu v numerických simulacích nebylo dosaženo shody s postupem odmlžování z experimentů.

2.2. Zvlhčovač - zařízení pro zavádění vlhkosti

Vzdušná vlhkost přirozeně proniká do světlometu během provozu odvětrávacími otvory. Pro výrobce světel a automobilky představuje potenciální riziko vzniku poruchy elektroniky světlometu, která je u moderních typů osvětlovací techniky velice citlivá. Při poklesu teploty povrchu pod rosný bod začne vlhkost kondenzovat a může vytvářet souvislou vrstvu nejčastěji na předním skle, kde rozráží procházející světelné paprsky a mění tvar světelné stopy, což má bezpečnostní dopady při provozu vozidla. Zároveň snižuje vycházející intenzitu osvětlení a v neposlední řadě nepůsobí esteticky a je zákazníky považována za závadný stav. Proto bylo autorem práce v Laboratoři přenosu tepla a proudění, VUT v Brně vyvinuto zařízení pro zavádění vlhkosti do světlometu, které je součástí měřicího zařízení – viz předchozí kapitola [48].

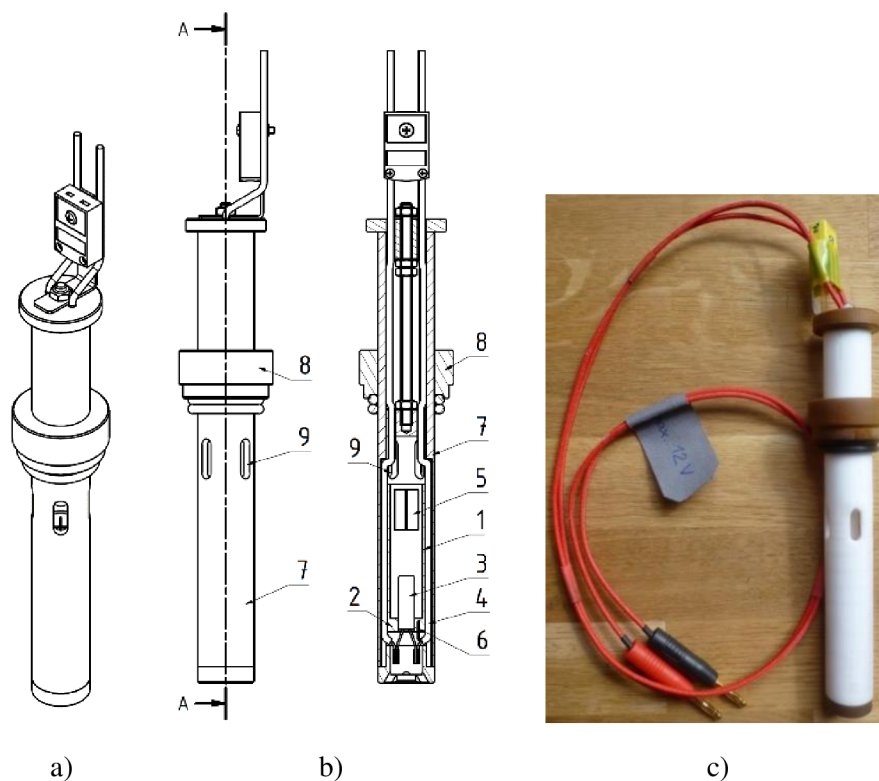
Běžně jsou pro testování odmlžení světlometů používány klimakomory s nastavenou vysokou relativní vlhkostí na požadovanou dobu, dokud nedojde k vyrovnání poměrů vně a uvnitř světlometu. Nevýhodou tohoto postupu je značná časová náročnost, běžně desítky hodin. Rovněž není možno provádět tyto testy operativně např. při zkušebních jízdách v terénu [48].

Vyvinutý zvlhčovač je patentově chráněn úřadem pro průmyslové vlastnictví pod názvem Zařízení ke zvlhčení vnitřního prostoru světlometu a jeho kopie je umístěna v příloze práce. Číslo přihlášky je 2015-385 a číslo dokumentu je 305743. Na jeho vývoji se spolupodílel autor práce a prof. Ing. Jaroslav Horský, CSc.

Vyvinuté zařízení si klade za úkol zrychlit celý proces testování, kdy zamlžení světlometu netrvá desítky hodin, ale odehrává se v řádu desítek minut. Zároveň odpadá nutnost provádět testy v drahých klimakomorách. Další výhodou je vypaření přesně stanoveného množství vody do světlometu [48].

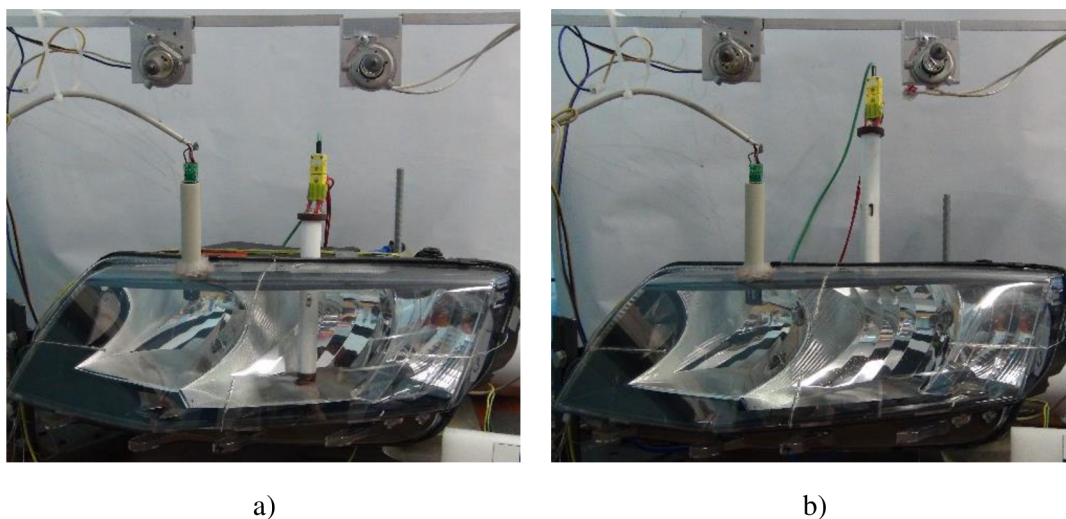
Zvlhčovač je tvořen z válcového těla, které umožňuje snadné vsunutí do světlometu kruhovým otvorem vytvořeným k tomuto účelu v horní části. Zařízení popisuje obr. 2.10 b) a jeho hlavní části jsou rezervoár 1, z jehož dna 2 vyčnívá do prostoru rezervoáru 1 topné těleso 3 propojeno s vnějším zdrojem elektrické energie vodiči 4. Rezervoár je nahoře otevřený, v horní části osazen vloženou mříží 5 v půdoryse ve tvaru kříže. Mříž 5 slouží k rozbíjení parních bublin a tím omezuje možnost vytékání vody v kapalně fázi do světlometu. Ve dně 2 je navíc zabudováno teplotní čidlo 6, které slouží hlavně k určení konce vypařování a zároveň zabraňuje poškození přístroje včasnou indikací zvýšené teploty. Rezervoár je uložen ve válcovém pouzdru 7 z teflonu. Na něho je nasunuta těsnící příruba 8, která má za úkol utěsnit mezeru mezi tělem zvlhčovače a otvorem ve světlometu. Zároveň umožňuje zvolit hloubku zasunutí. Nad úroveň horní strany rezervoáru 1 jsou v těle zařízení vyvrtány čtyři otvory 9, kterými je distribuována vodní pára z rezervoáru 1 do okolí [48].

Přesně stanovené množství vody je do rezervoáru 1 přivedeno injekční stříkačkou přes otvory 9. Prostřednictvím regulovatelného zdroje je nastaveno na topném tělese 3 takový výkon, který vodu v rezervoáru 1 ohřeje co nejrychleji, ale při tom nedojde k vytečení nebo vystříknutí vody do prostoru světlometu. Vodní pára uniká otvory 9. Konec odpařování je určen prostřednictvím teplotního čidla 6 zabudovaného ve dně 2 rezervoáru 1. Jakmile je proces ukončen, zařízení je vytaženo ze světlometu a otvor ve světlometu je utěsněn [48].



Obr. 2.10 Zvlhčovač (a – 3D model, b – Popis, c – Reálné zařízení, 1 rezervoár, 2 dno rezervoáru, 3 topné těleso, 4 elektrické vodiče, 5 mříž, 6 teplotní čidlo, 7 pouzdro, 8 těsnící příruba, 9 otvory)

Zařízení ke zvlhčení vnitřního prostoru světlometu je součástí měřícího zařízení na testování odmlžení světlometů, které je popsáno v předchozí kapitole.



Obr. 2.11 Zvlhčovací zařízení (a – Poloha pro zavlhčení, b – Poloha během hlavní části experimentu)

Předchozím Obr. 2.11 zobrazuje dvě hlavní pozice zvlhčovače během měření odmlžování. Nejprve bylo zařízení během zamlžování předního skla vsunuto do světlometu a po ukončení bylo vytaženo ven, aby nenarušovalo rychlostní pole vlhkého vzduchu během odmlžovací fáze měření – viz kapitola 2.4 Experimentální odmlžování světlometů.

Patentově chráněný zvlhčovač a metodika zamlžování světlometů vyvinutá v rámci dizertační práce je zcela unikátní. Běžně používané testování odmlžení trvá desítky hodin až několik dnů. Výhodou nové metodiky je zkrácení potřebného času na několik hodin a známé podmínky na počátku tvorby kondenzátu, kdy do vnitřního prostoru světlometu bylo vypařeno přesně definované množství vody, které bylo následně zkondenzováno na vnitřní ploše předního skla. Pro dosažení reálných výsledků z numerických simulací (viz kapitola 2.5 Numerické simulace odmlžování světlometů) je klíčová tvorba kondenzace. Způsob zamlžení pomocí zvlhčovače umožňuje jednoduše popsat jednotlivé procedury okrajovými a počátečními podmínkami. Celkové rozměry vyvinutého zvlhčovače jsou dostatečně malé, aby se dal umístit i do menších prostorů ve světlometu.

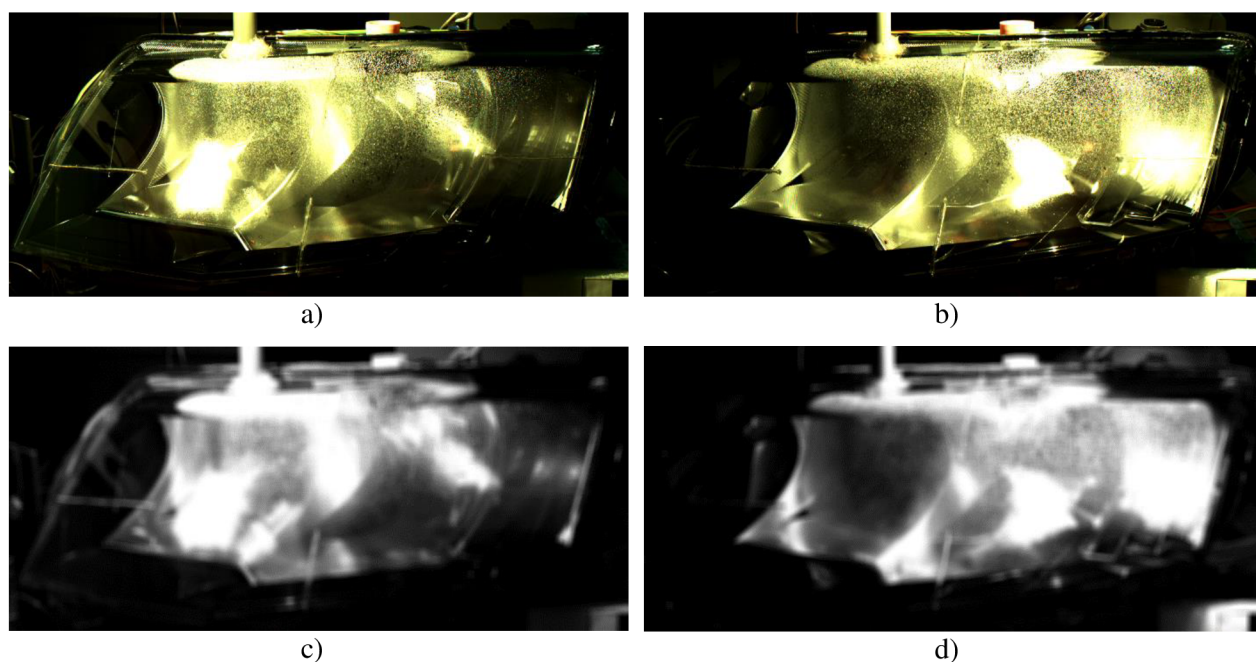
2.3. Automatická detekce kondenzátu z fotografií

Stejně jako postup odmlžovacích testů, tak ani vyhodnocování pořízených fotografií nemá přesně definované podmínky pro detekci zamlžených oblastí. Každá automobilka má své interní přístupy k řešení a testování této problematiky. Některé preferují laboratorní testy, jiné provozní zkoušky nebo jejich kombinaci viz kapitola 1.7 Přehled stávající situace testování odmlžení. Program pro automatickou detekci zamlžené a odmlžené oblasti předního skla světlometu byl vyvinut autorem práce jako součást testů odmlžení pro firmu Škoda Auto a.s. Jeho využití je jak pro vyhodnocování laboratorních testů, tak i jízdních zkoušek, kde dokáže poskytnout přesnější výsledky, než jsou dnes používané přístupy.

Hlavní funkcí programu je automaticky provádět obrazovou analýzu z pořízených barevných fotografií, které jsou převedeny do odstínů šedi. Každý pixel je tedy charakterizován pouze svojí intenzitou. Intenzita každého pixelu je porovnána s referenční fotografií. Pro určení referenčních stavů jsou vybrány fotografie pořízené při úplném zamlžení a úplném odmlžení. Z těchto dvou stavů je určen rozdíl v intenzitě. Výsledkem této analýzy je číselné zhodnocení zamlžené (*Z*), odmlžené (*O*) a nevyhodnotitelné (*N*) oblasti z fotografií (levá a pravá) pro daný časový okamžik a barevné odlišení těchto tří režimů ve fotografiích. Osvětlování fotografií hraje kritickou roli při následné softwarové detekci, proto byla této problematice věnována velká pozornost – viz podkapitola Způsoby osvětlování.

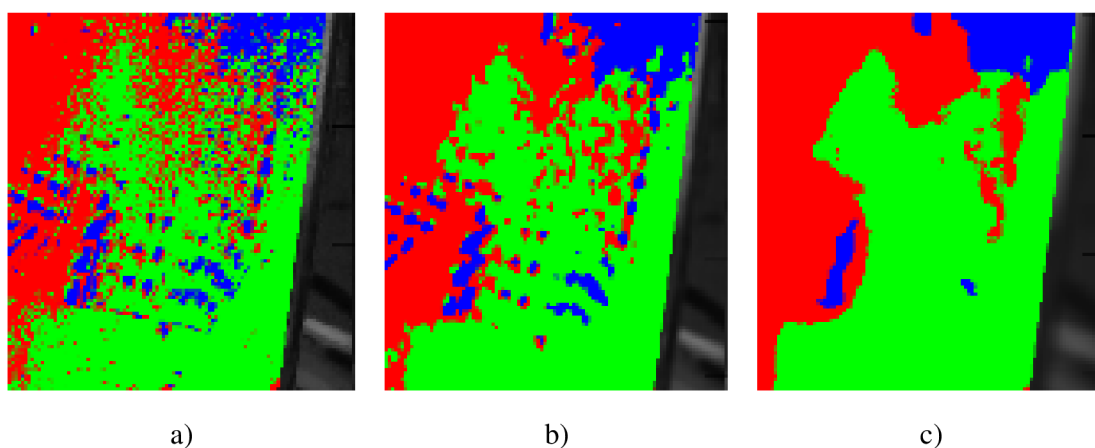
Algoritmus programu

Uživatel stanoví na zamlženém snímku velikost a tvar oblasti, kterou bude vyhodnocovat. Následně je snímek převeden na stupně šedi, tím je celý proces vyhodnocování zjednodušen (místo tří barev je vyhodnocována pouze jedna) viz – Obr. 2.12 c) a Obr. 2.12 d). Zároveň je odstraněn potenciální problém s rozdílnou teplotou chromatičnosti světelného zdroje u jednotlivých snímků. U každé fotografie je provedena kalibrace světlosti a kontrastu podle referenčních hodnot získaných ze dvou krajních stavů a to úplně zamlženo a úplně odmlženo pro daný experiment. Na základě histogramu z černého a bílého terčíku připevněného na světlomet je stanovena hodnota referenční intenzity pro černý a bílý pixel.



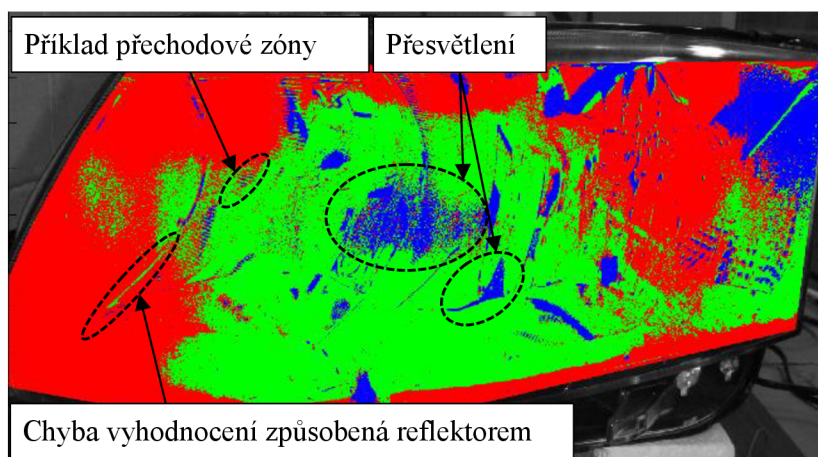
Obr. 2.12 Ukázka postupu úpravy fotografií (a – levá původní, b – pravá původní, c – levá upravená, d – pravá upravená)

Z těchto dvou fotografií je určena průměrná referenční hodnota, podle které bude kalibrována každá fotografie. Pokud je na vyhodnocovaném snímku rozdíl intenzity bílých a černých pixelů oproti retenční hodnotě velký je tato fotografie vyřazena. Z důvodu přesvětlení nebo naopak nedostatečnému nasvětlení. Malý rozdíl je softwarově dorovnán. Na takto nachystané fotografie je aplikován numerický filtr, který vypočítá každému pixelu novou hodnotu intenzity odstínu na základě průměrné intenzity výřezu z jeho okolí. U čtvercového výřezu lze libovolně navolit velikost, tím se celá fotografie rozostří (rozmaže) – viz Obr. 2.12 c) a Obr. 2.12 d). Velikost výřezu okolí má zásadní vliv na vyhodnocení fotografie v přechodové zóně, kde je intenzita odstínu blízká mezní intenzitě, která určuje rozdíl mezi zamlženou a odmlženou oblastí – viz obr. 2.13.



Obr. 2.13 Vliv velikosti oblasti filtru na hranici mezi zamlženou (červená) a odmlženou (zelená) oblastí (a – 0 pixelů bez filtru, b – 3 pixelů, c – 10 pixelů), modrá znázorňuje nevyhodnotitelné oblasti

Hlavní důvod použití filtru je zredukování množství drobných chybně vyhodnocených nebo nevyhodnotitelných oblastí, které vznikají v důsledku šumu na pořizovaných fotografiích, malých posuvů kamery nebo drobných náhodných odlesků – viz obr. 2.14. Další výhodou je zjednodušení tvaru hranice mezi zamlženou a odmlženou oblastí, které přispívá k přehlednému vyobrazení.



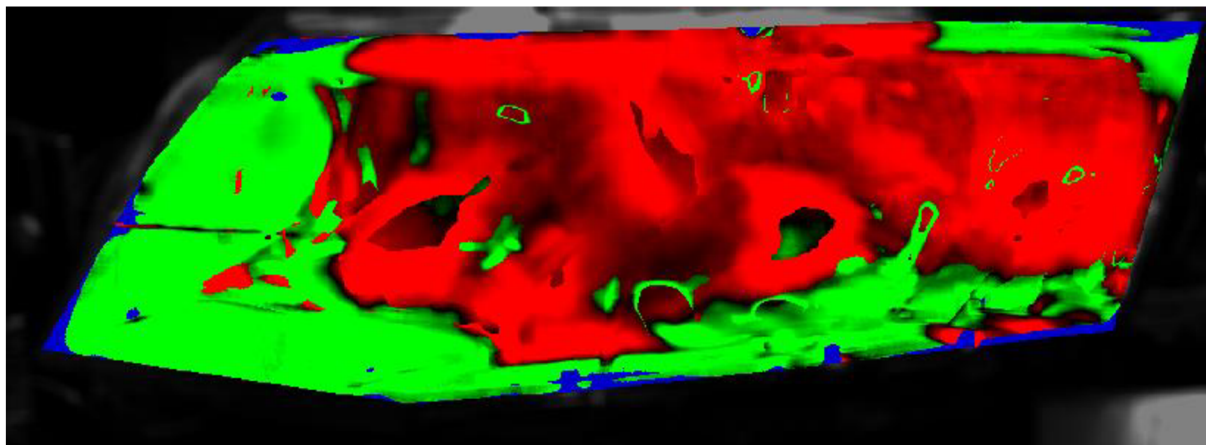
Obr. 2.14 Vyhodnocený snímek bez použití filtru

Na základě pořízeného fotografického záznamu odmlžení je hledána mezní intenzita odstínu $p_0 \in \langle 0; 1 \rangle$, která určuje, zda vyhodnocovaný pixel náleží odmlžené nebo zamlžené oblasti. Jeho hodnota je naladěna, tak aby vyhodnocené fotografie odpovídaly okem pozorované realitě. Pro jiné nastavení světel nebo fotoaparátu je nutné tuto hodnotu určit znovu stejným postupem. Dvě fotografie pro úplně odmlžený a úplně zamlžený stav jsou použity jako referenční, ze kterých je následně určen rozsah změny intenzity $d_{(i,j)}$ pro každý pixel. Zároveň je provedena kontrola, zda je rozdíl odstínů dostatečný pro správné vyhodnocení. Pomocí podmínky vyhodnotitelnosti daného pixelu, která je definována $d_{(i,j)} > \varepsilon$. Kde ε je uživatelem zadaný minimální rozdíl intenzity odstínu nutný pro správné vyhodnocení daného pixelu. Dále je pro vyhodnotitelné pixely spočtena hodnota $p_{(i,j)}$, která udává relativní rozdíl intenzity vyhodnocovaného pixelu a stejného pixelu v referenční zamlžené fotografii. $p_{(i,j)}$ leží v intervalu $p_{(i,j)} \in \langle 0; 1 \rangle$, kde $p_{(i,j)} = 0$ je plně zamřzený stav a $p_{(i,j)} = 1$ je plně odmlžený stav. Poté se hodnota $p_{(i,j)}$ porovná vůči mezní hodnotě p_0 , zvolené uživatelem $p_{(i,j)} > p_0$. Paralelně je celý postup proveden pro fotografii s levým a pravým nasvícením v daném časovém okamžiku. Důvodem použití více fotografií pro vyhodnocení v jednom časovém okamžiku je omezení míst, která nejdu vyhodnotit z důvodu odlesků vzniklých při osvětlení fotografií – viz podkapitola Způsoby osvětlování. Z kombinace výsledků obou fotografií pro jednotlivé pixely je složena matice výsledného rozložení zamlžené, odmlžené a nevyhodnotitelné oblasti. Postup určení těchto tří oblastí je popsán v následující tabulce tab. 2.1, kde N je nevyhodnotitelná oblast, (Z) je zamlžená oblast a (O) je odmlžená oblast.

Tab. 2.1 Skládání výsledků z levé a pravé fotografie

| | $N_{pravá}$ | $Z_{pravá}$ | $O_{pravá}$ |
|------------|-------------|-------------|-------------|
| $N_{levá}$ | N | Z | O |
| $Z_{levá}$ | Z | Z | ? |
| $O_{levá}$ | O | ? | O |

Zobrazení výsledků z obou snímků do jedné fotografie, ve které jsou vizuálně odlišeny tři možné stavy N , Z , O a číselně zobrazen jejich podíl v celkové vyhodnocované oblasti. Pro případ, že daný pixel vychází z jedné fotografie odmlžen a z druhé zamlžen (v tab. 2.1 jsou označeny ?) dojde k porovnání parametru $d_{(i,j)}$ pro levou a pravou fotografii a z výsledků je stanoveno, která fotografie má v daném pixelu větší rozsah odstínu (větší důvěryhodnost) a podle ní je pixel posuzován.



Obr. 2.15 Ukázka vyhodnocené fotografie se znázorněnými důležitými oblastmi (zelená – odmlžená, červená – zamlžená, modrá – nevyhodnotitelná)

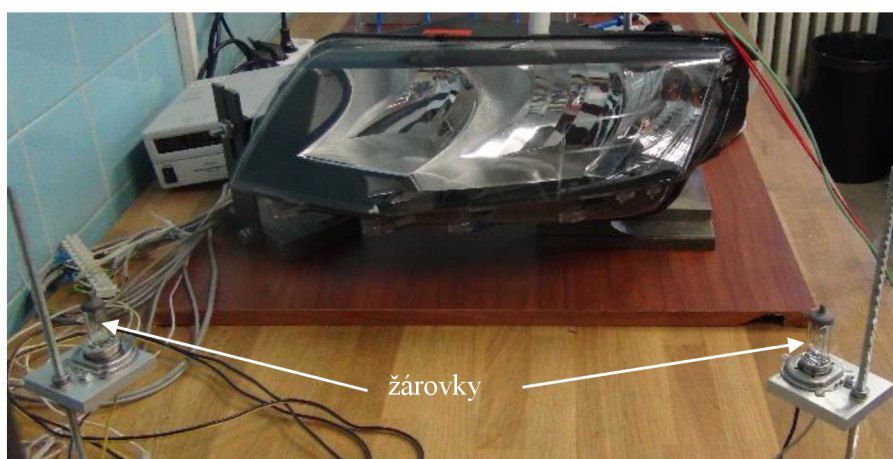
Způsoby osvětlování

Osvětlování hraje významnou roli při následném automatickém rozpoznávání zamlžené a odmlžené oblasti u pořízených fotografií. Je důležité mít dostatečně nasvícenou celou vyhodnocovanou plochu světlometu, ale zároveň zamezit přesvětlení. Každý světlomet má reflektor s odrazovými ploškami a vysokou reflektancí viz kapitola 1.3 Typy světlometů a moderní systémy osvětlení. Proto je náročné docílit vhodného osvětlení kondenzátu. Světelné zdroje musí být umístěny do pozic, které zajišťují homogenní nasvětlení (bez míst s nízkou úrovní světlosti), což není vzhledem k tvarové různorodosti předního skla jednoduché. Byly zvoleny tři způsoby osvětlování.

- *První přístup* – k osvětlení bylo použito současně dvou dobových světelných zdrojů, které byly umístěny před světlomet viz obr. 2.16. Ovšem u této metody bylo cca 10 % nevyhodnotitelné oblasti, což nebyl uspokojivý výsledek.

Proto byla hledaná možnost, jak omezit velké množství odrazů, které znemožňovali správné vyhodnocení.

- *Druhý přístup* – byly zkoušeny různé pozice osvětlení před světlometem, přičemž byly testovány různé vzdálenosti a úhly, ale nebylo nalezena konfigurace, která by výrazně zamezovala odleskům od reflektoru. Proto byl vyvinut střídavý způsob osvětlováním z různých úhlů.

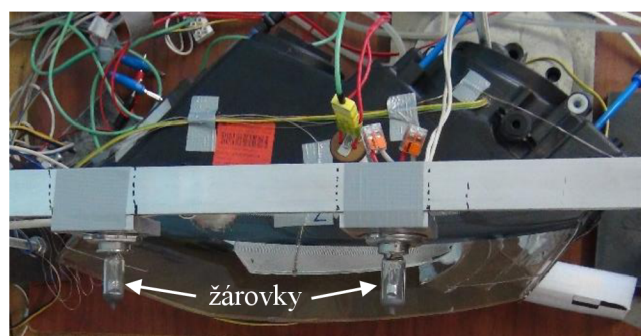


Obr. 2.16 Nasvětlení zepředu

- *Třetí přístup* – byl změna pozice žárovek, které byly umístěny na konstrukci nad světlomet (viz obr. 2.17), aby byl změněn úhel nasvětlení kondenzátu a světlo nešlo přímo do kamery.



a)



b)

Obr. 2.17 Nasvětlení seshora (a – Přední pohled, b – Horní pohled)

I když existují i jiné přístupy vyhodnocování pořízených fotografií, jako například Fourierova transformace zvolená metoda změny barevné intenzity je vhodný nástroj pro tyto aplikace. Program obrazové analýzy dokáže lokalizovat problémová místa a popsat časový průběh odmlžení pro konstrukční modifikace během počátečních fází vývoje nového světlometu. Dále na základě procentuální zastoupení zamlžené a odmlžené oblasti z vyhodnocených snímků jednoduše porovnat různé konfigurace přetlaků na odvětrávacích otvorech. Pro přesné vyhodnocování fotografií bylo ovšem kritické nasvětlení, kterému byla věnována značná pozornost. bylo důležité, aby pořízené snímky nebyly nedosvětlené, ale zároveň nepřesvětlené. Vzhledem k tvaru testovaného světlometu bylo potřeba vhodně nasvětlit i krajní části, které jsou v zákrytu. Proti tomuto požadavku jde podmínka nepřesvětlení, která byla ve většině případů způsobená reflektorem s odrazovými plochami. Ten odráží světelné paprsky do objektivu fotoaparátu a znemožňuje vyhodnotit tato místa. Ovšem za použití způsobu osvětlování z horní strany dle obr. 2.17 byl tento jev značně redukován. Nevýhodnotitelná oblast se pohybuje kolem 3 % z celé přední plochy světlometu, což je z velké části způsobeno nedostatečnou tloušťkou kondenzovaného filmu v daných místech.

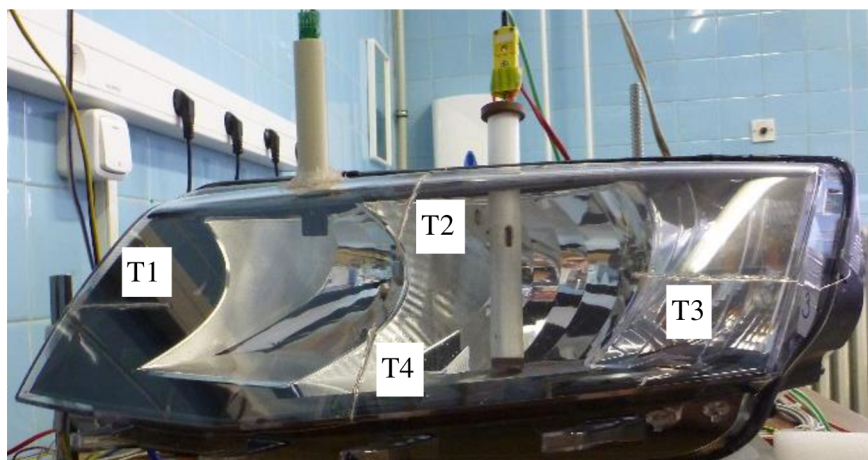
2.4. Experimentální odmlžování světlometů

Pro potřeby testování odmlžování světlometů byla autorem práce v Laboratoři tepla a proudění, VUT v Brně vyvinuta nová procedura testování automobilových světlometů na odmlžení. S požadavky na celkovou časovou a finanční nenáročnost měření a rovněž i na dobrou reprodukci dosažených výsledků (časový záznam ústupu kondenzátu). Celé měření bylo navrženo s ohledem na jednoduché přenesení naměřených hodnot do numerických simulací, jako okrajové a počáteční podmínky.

Pro odmlžovací testy bylo nejprve zapotřebí světlomet upravit, aby se daly na odvětrávací otvory připojit hadice pro rozvod tlakového vzduchu z měřicího zařízení. Dále byly do horní strany světlometu vyvrtány dvě díry pro senzor relativní vlhkosti a zvlhčovač. Nakonec bylo přední sklo osazeno termočlánky pro monitoring teploty během zamlžování – viz kapitola 2.1 Měřicí zařízení pro testování odmlžení světlometů.

Experiment byl rozdělen do dvou fází. V přípravné fázi byl světlomet zamlžen a v hlavní části probíhalo samotné odmlžení.

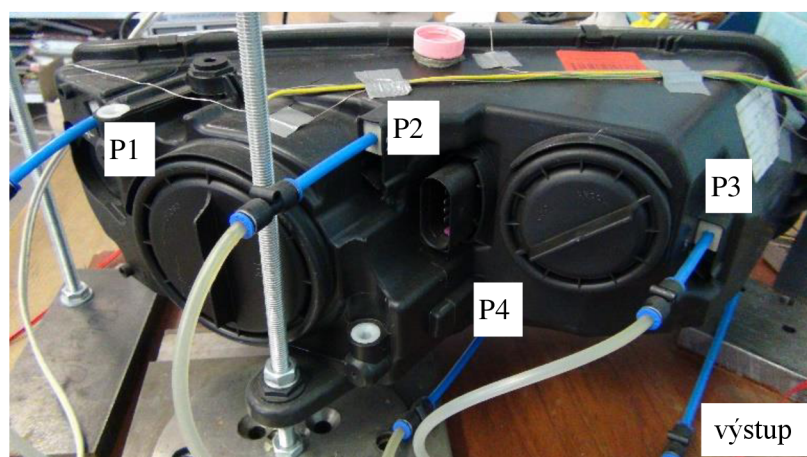
Během přípravné fáze experimentu byl do světlometu umístěn zvlhčovač s požadovaným množstvím vody. Poté bylo přední sklo podchlazeno pod teplotu rosného bodu. Jakmile bylo dosaženo vhodné teploty, byl zapnut zvlhčovač a započal proces vypařování vody z rezervoáru. Během celého procesu byla sledována hodnota relativní vlhkosti vnitřního prostoru světlometu. Je důležité, aby bylo docíleno zkondenzování veškeré vypařené vody na předním skle a ne jinde. Pro monitoring teploty byly v předním skle umístěny čtyři termočlánky.



Obr. 2.18 Pozice jednotlivých termočlánků předního skla

Pro hlavní fázi experimentu není potřeba klimakomory k nastavení okolní teploty a relativní vlhkosti. Postup experimentu probíhal následovně: Připravený světlomet byl umístěn do držáků měřicího zařízení, aby bylo zabráněno možnému pohybu nebo posunu světlometu. Dále bylo zvlhčovačem vypařeno do vnitřního prostoru dané množství vody a přední kryt byl podchlazen pod teplotu rosného bodu. Po uplynutí dostatečné doby nutné ke zkondenzování vlhkosti na předním skle byl do světlometu přiveden odvětrávacími otvory vzduch z okolí a zvlhčovač byl povytažen mimo vnitřní prostor. V tomto okamžiku začíná samotný experiment a jeho průběh byl zaznamenáván průběžným pořizováním fotografií a uložením všech důležitých fyzikálních veličin. Pro jeden časový okamžik byly pořízeny vždy dvě fotografie. Světlomet byl osvětlován střídavě, aby bylo docíleno homogenního nasvětlení kondenzátu a došlo k potlačení míst s odlesky.

Experiment byl ukončen v okamžiku, kdy byl veškerý kondenzát odstraněn nebo po uplynutí tří hodin od začátku hlavní fáze.



Obr. 2.19 Pozice jednotlivých odvětrávacích otvorů

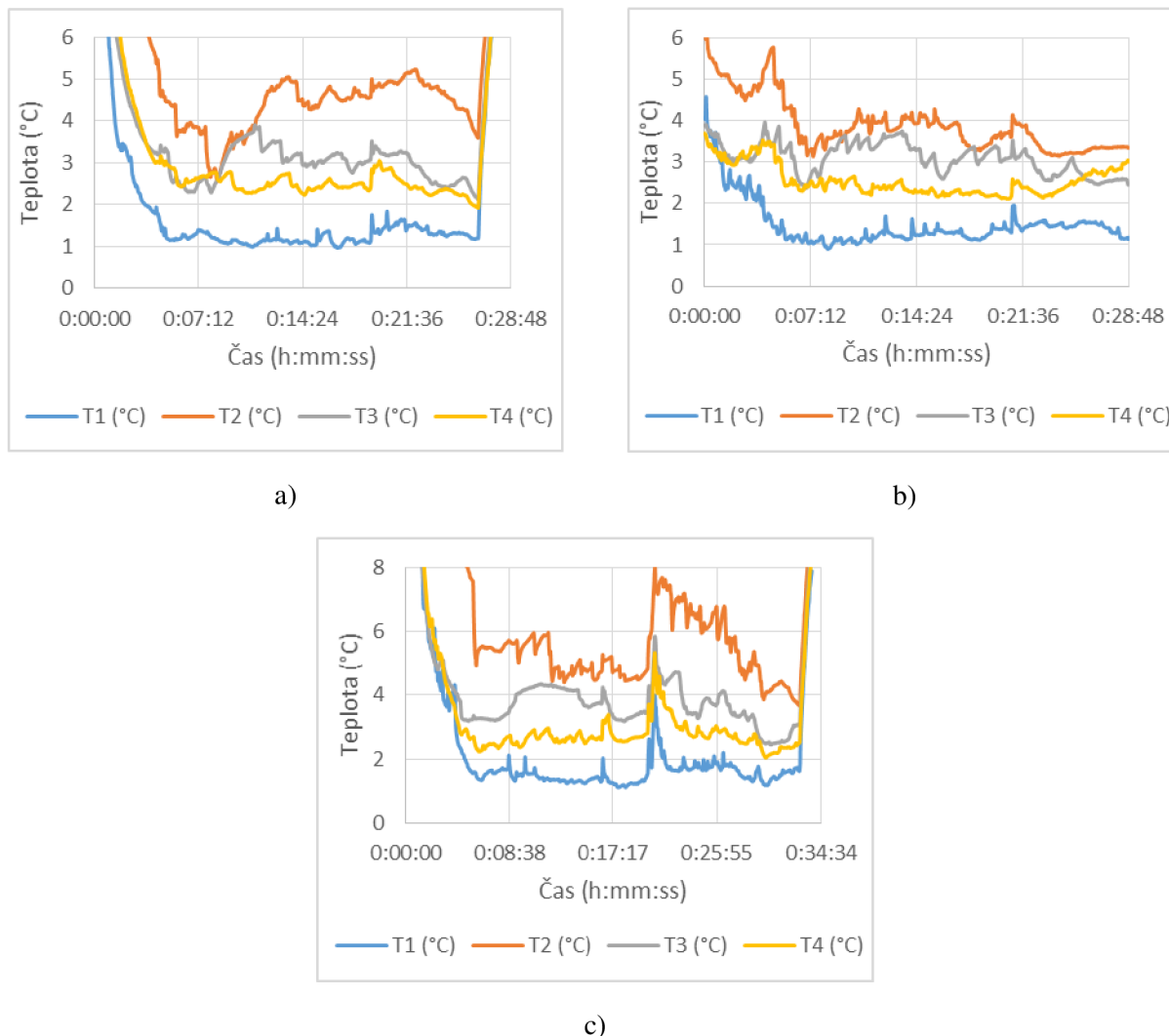
Cílem experimentů bylo porovnat jednotlivé konfigurace s různými množství vypařované vody a verifikovat numerické simulace odmlžování světlometů porovnáním jejich výsledků s měřením pro vybrané konfigurace přetlaků na odvětrávacích otvorech a množství vypařované vody. Pro verifikaci simulací byly zvoleny tři konfigurace, které byly rozdílné v množství odpařované vody. Cílem těchto měření původně bylo ověřit podmínky, které jsou v zabudovaném světlometu v automobilu. Což by znamenalo měřit s přetlakem na odvětrávacích otvorech do 5 Pa. Tyto hodnoty byly vypočítány z numerických simulací motorového prostoru, které byly počítány společností Škoda Auto a.s. S přihlédnutím na náročnost měření takto nízkých přetlaků a opakovatelnost naměřených výsledků byla zvolena řádově vyšší hodnota – viz následující tabulka.

Tab. 2.2 Konfigurace experimentů odmlžování světlometů

| Označení exp. | Množství vypařované vody (ml) | Přetlaky P1 až P4 (Pa) |
|---------------|-------------------------------|------------------------|
| V1p60 | 1 | 60 |
| V1,5p60 | 1,5 | 60 |
| V2p60 | 2 | 60 |

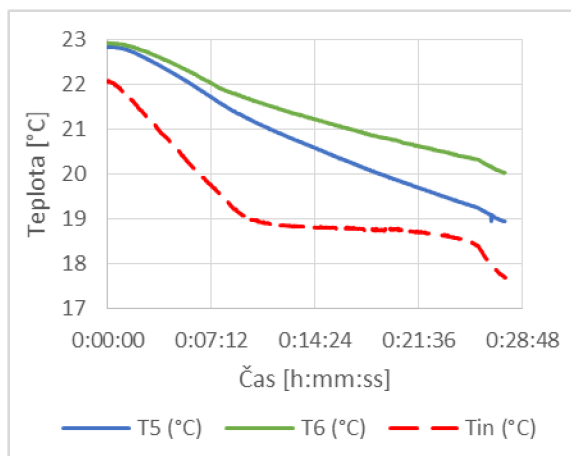
Zamlžování – Přípravná fáze

V přípravné části bylo provedeno zkondenzování vypařené vody zvlhčovačem na vnitřní straně předního skla světlometu. Hlavní činnosti byly zchlazení předního skla pod rosný bod a následná kondenzace vypařované vody. Celý proces popisují přiložené grafy s hlavními měřeními veličinami: teploty světlometu, teplota okolí, relativní vlhkost okolí, příkon zvlhčovače a relativní vlhkost uvnitř světlometu.

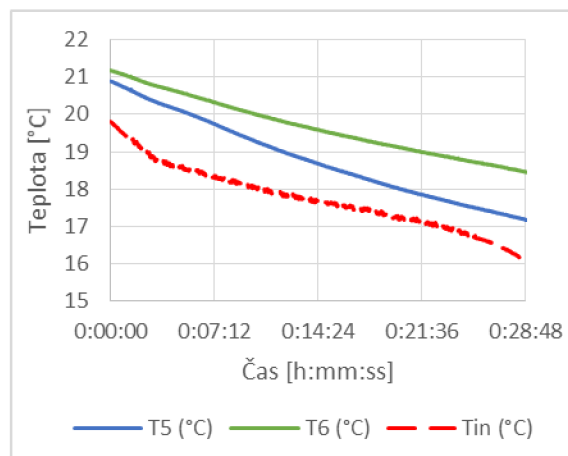


Obr. 2.20 Teploty na skle (a – V1p60, b – V1,5p60, c – V2p60)

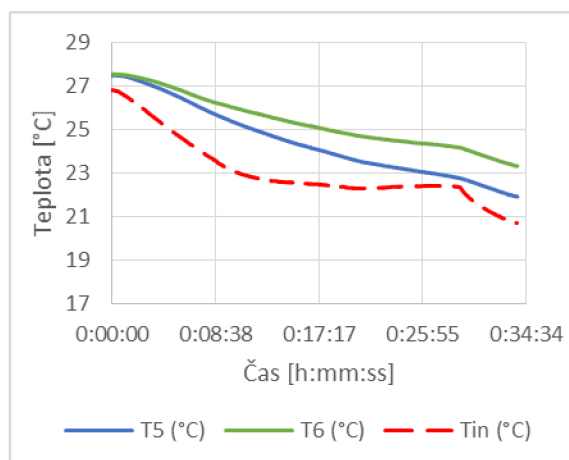
Teplota předního skla byla monitorována pomocí čtyř termočlánků, jejichž pozice jsou ukázány na obr. 2.18. Pro všechny experimenty byly teploty pod teplotou rosného bodu pro danou relativní vlhkost a teplotu vzduchu uvnitř světlometu během přípravné fáze kondenzování. Pro experiment V1p60 byly teploty skla v rozmezí od 1 °C do 5 °C, přičemž teplota rosného bodu byla 9,6 °C pro teplotu uvnitř 18,8 °C a relativní vlhkost 55,2 %. Při experimentu V1,5p60 byly teploty skla od 1°C do 4°C, přičemž teplota rosného bodu byla 10,4 °C pro teplotu uvnitř 17,9 °C a relativní vlhkost 61,5 %. U posledního měření V2p60 byly teploty skla od 1,5 °C do 6 °C, přičemž teplota rosného bodu byla 14,7 °C pro teplotu uvnitř 22,5 °C a relativní vlhkost 61,2 %.



a)



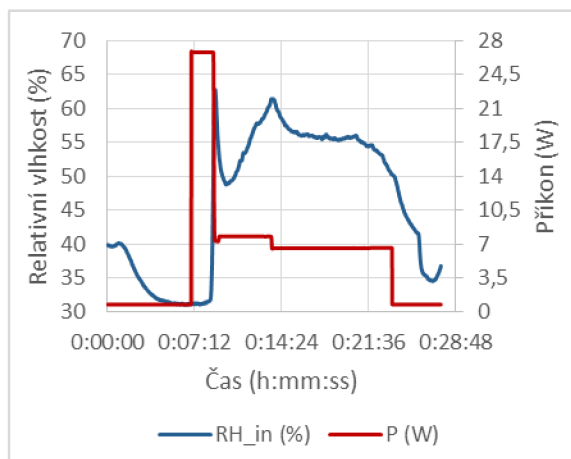
b)



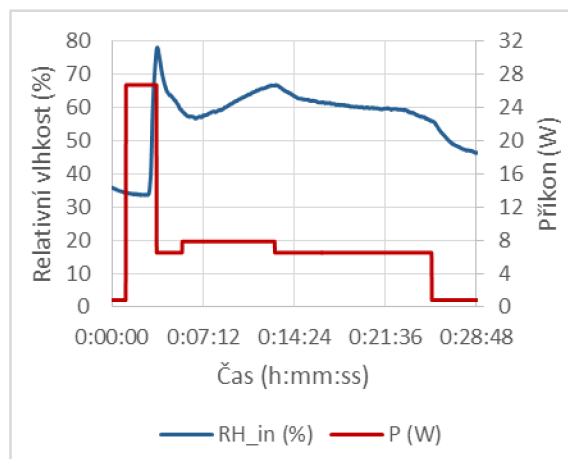
c)

Obr. 2.21 Teploty uvnitř světlometu (a – V1p60, b – V1,5p60, c – V2p60)

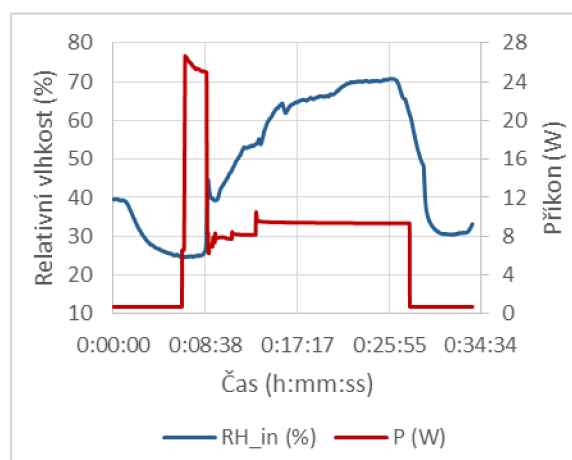
Teploty uvnitř světlometu během kondenzace klesají z důvodu chlazení předního skla pod teplotu rosného bodu. Teplota vzduchu uvnitř světlometu byla po ustálení pro jednotlivá měření: V1p60 na 18,8 °C, pro V1,5p60 na 17,9 °C a pro V2p60 na 22,5 °C. Tin byla teplota vzduchu uvnitř světlometu. T5 a T6 byly teploty vnitřních ploch světlometu, které byly umístěny na reflektoru.



a)



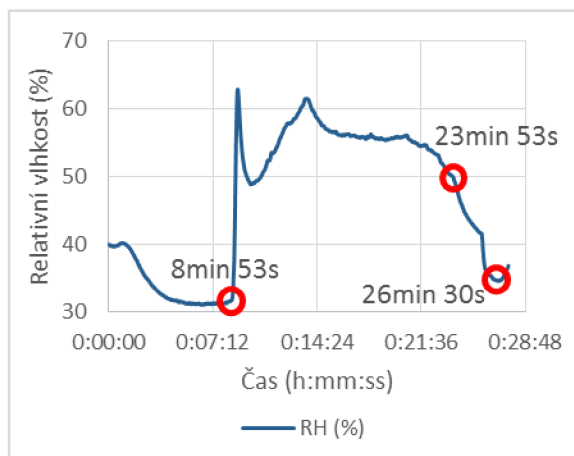
b)



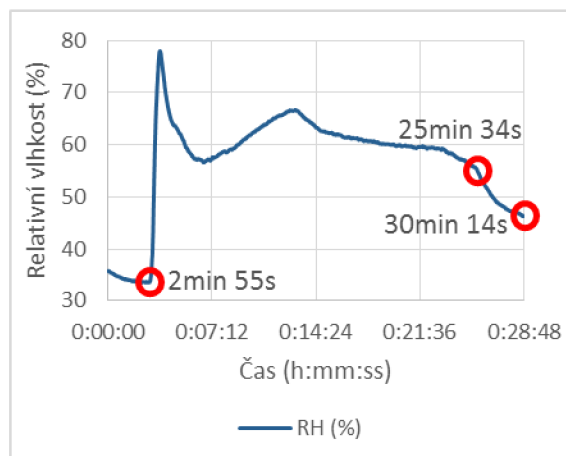
c)

Obr. 2.22 Příkon zvlhčovače (a – V1p60, b – V1,5p60, c – V2p60)

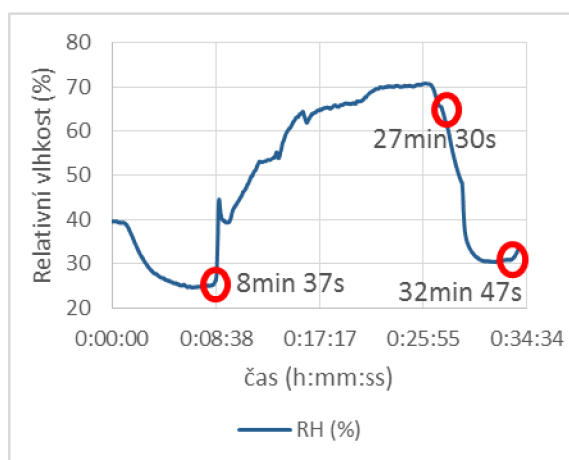
Při regulaci příkonu zvlhčovače ve světloometu pomocí plynule nastavitelného laboratorního zdroje (viz kapitola 2.2 Zvlhčovač - zařízení pro zavádění vlhkosti) během zamlžování byl kladen důraz na to, aby relativní vlhkost uvnitř světloometu nepřekročila dlouhodobě 70 %, a tím nedocházelo ke kondenzaci i mimo oblast předního skla. Pro teplotu vzduchu 22 °C a relativní vlhkost 90 % je teplota rosného bodu 20,3 °C. Pokud budeme snižovat relativní vlhkost, tak dostaneme pro 80 % teplotu rosného bodu 18,4 °C, pro 70 % se dostáváme na 16,3 °C, což je dostatečná teplotní rezerva k zabránění kondenzace na vnitřních plochách světloometu.



a)



b)



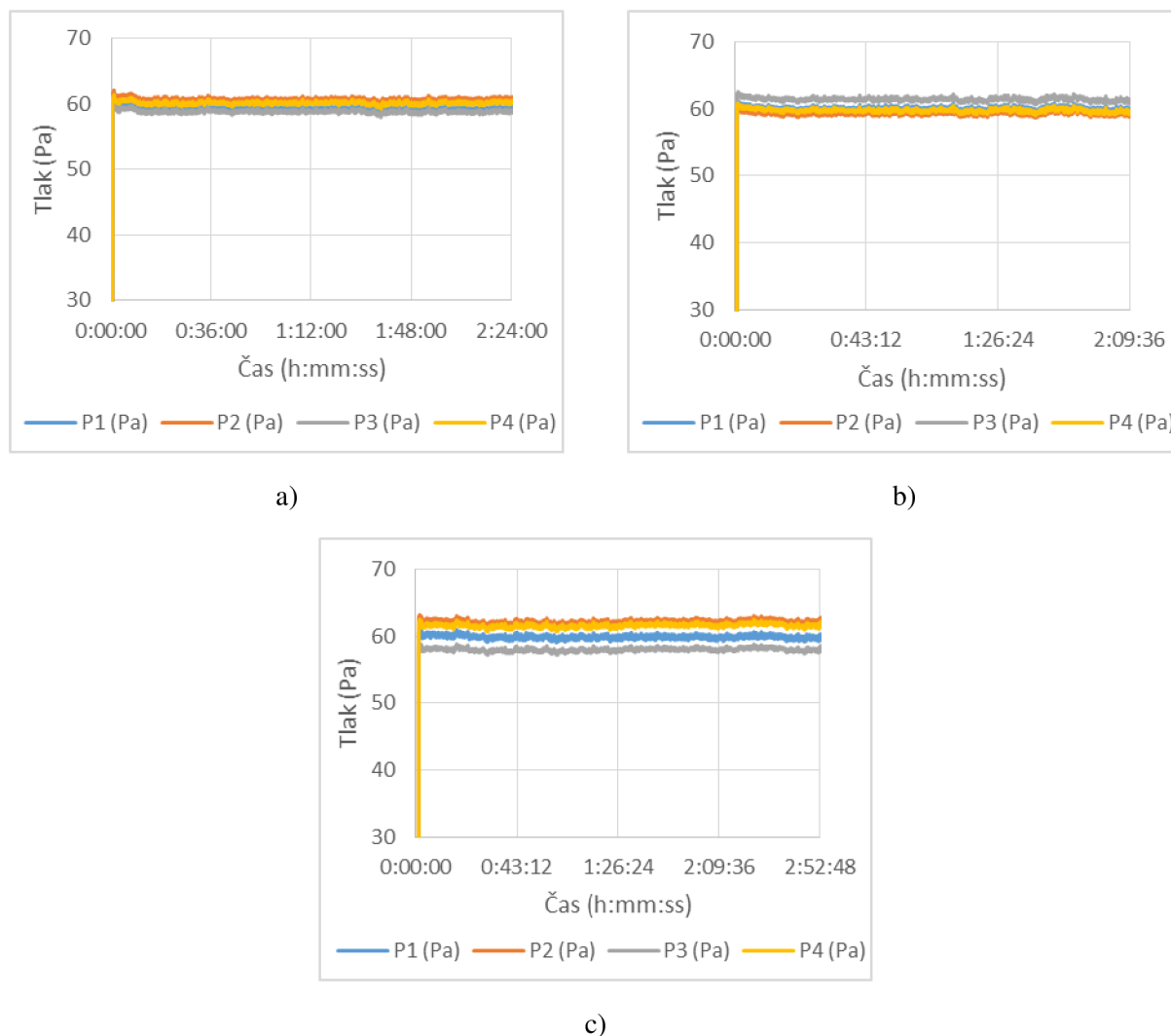
c)

Obr. 2.23 Relativní vlhkost s vyznačenými důležitými body: začátek a konec vypařování a konec chlazení skla (a – V1p60, b – V1,5p60, c – V2p60)

Průběh relativní vlhkosti uvnitř světlometu je dán regulací příkonu zvlhčovače (viz kapitola 2.2 Zvlhčovač - zařízení pro zavádění vlhkosti). Pro experiment V1p60 byla průměrná relativní vlhkost během vypařování 55,2 % a celkový čas nutný k odpaření 1 ml vody byl 15 min. Pro měření V1,5p60 byla průměrná relativní vlhkost během vypařování 61,5 % a celková čas nutný k odpaření 1,5 ml vody byl 22 min 40 sekund. U posledního měření V2p60 byla průměrná relativní vlhkost během vypařování 61,2 % a celkový čas nutný k odpaření 2 ml vody byl 18 min 53 sekund. Po dokončení vypaření bylo pokračováno v chlazení skla po následujících 5 minut, aby se snížila relativní vlhkost a nedocházelo k jejímu velkému nárůstu během přípravy na hlavní fázi experimentu – odmlžení.

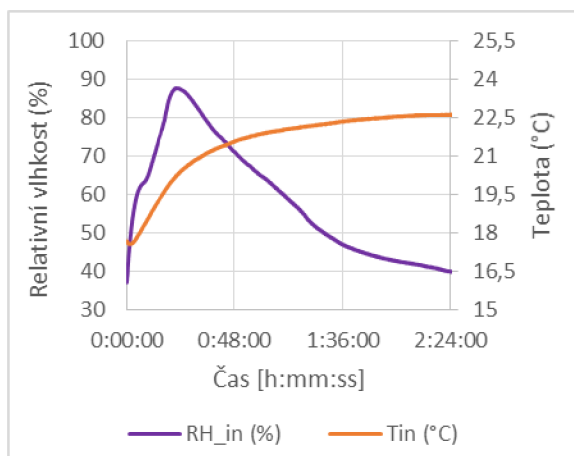
Odmlžování – Hlavní fáze

Po dokončení přípravné části experimentu měl již světlomet zkondenzovanou vodu vypařenou zvlhčovačem na vnitřní straně předního skla. Sklo bylo očištěno z venčí od kapek vody a nečistot, aby během focení nebyly výsledné fotografie zkresleny. V dalším kroku byl na odvětrávací otvory přiváděn vzduch o předepsaném přetlaku. Během této fáze byly zaznamenávány následující veličiny: přetlaky na odvětrávacích otvorech, teplota a relativní vlhkost uvnitř světlometu, teploty na předním skle, teplota a relativní vlhkost přiváděného vzduchu.

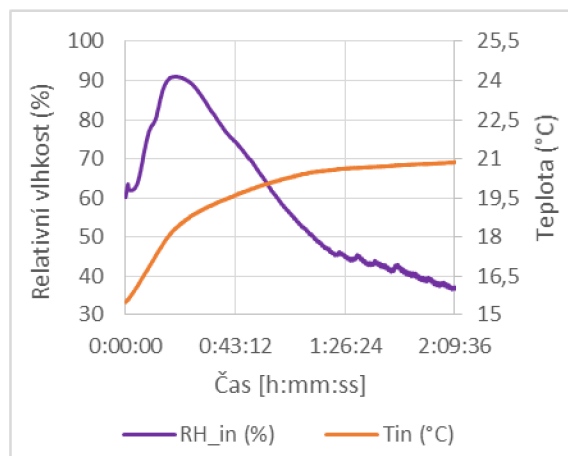


Obr. 2.24 Přetlaky na odvětrávacích otvorech (a – V1p60, b – V1,5p60, c – V2p60)

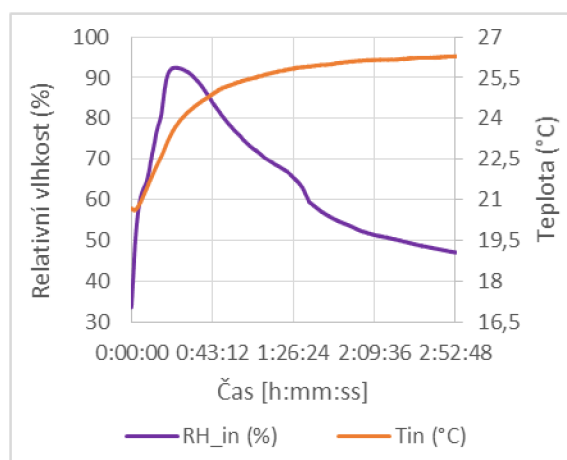
Přetlaky na odvětrávacích otvorech byly nastaveny pro všechny tři konfigurace měření stejně 60 Pa. Pozice jednotlivých otvorů s nastavovanými přetlaky jsou znázorněny na obr. 2.19. Pro experiment V1p60 byl rozdíl mezi minimální P3 a maximální P2 hodnotou přetlaku 2 Pa. Pro konfigurace V1,5p60 byl rozdíl mezi minimální P1 a maximální P3 hodnotou přetlaku 2 Pa. U posledního měření V2p60 byl rozdíl mezi minimální P3 a maximální P2 hodnotou přetlaku 4,2 Pa.



a)



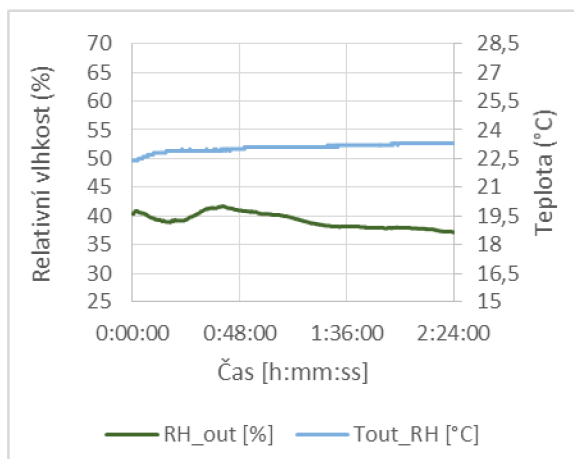
b)



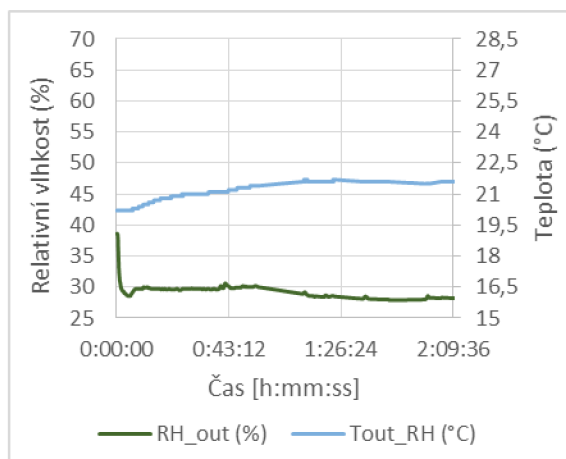
c)

Obr. 2.25 Parametry vzduchu uvnitř světlometu (a – V1p60, b – V1,5p60, c – V2p60)

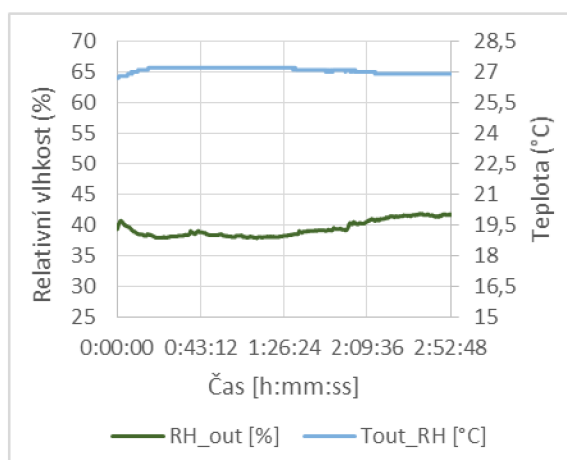
Relativní vlhkost uvnitř světlometu ve všech třech případech v prvních minutách roste, až do 21 min 30 sekundy, což je způsobeno postupným uvolňováním vlhkosti ze zkondenzované vrstvy předního skla. Rychlost uvolňování vlhkosti je větší, než schopnosti nově přiváděného vzduchu odvětrávacími otvory tuto přebytečnou vlhkost odvádět. Teplota uvnitř byla na začátku hlavní fáze nižší, což bylo způsobeno vychlazením předního skla. Ovšem v průběhu experimentu byla postupně dorovnána s teplotou okolí (v místnosti).



a)



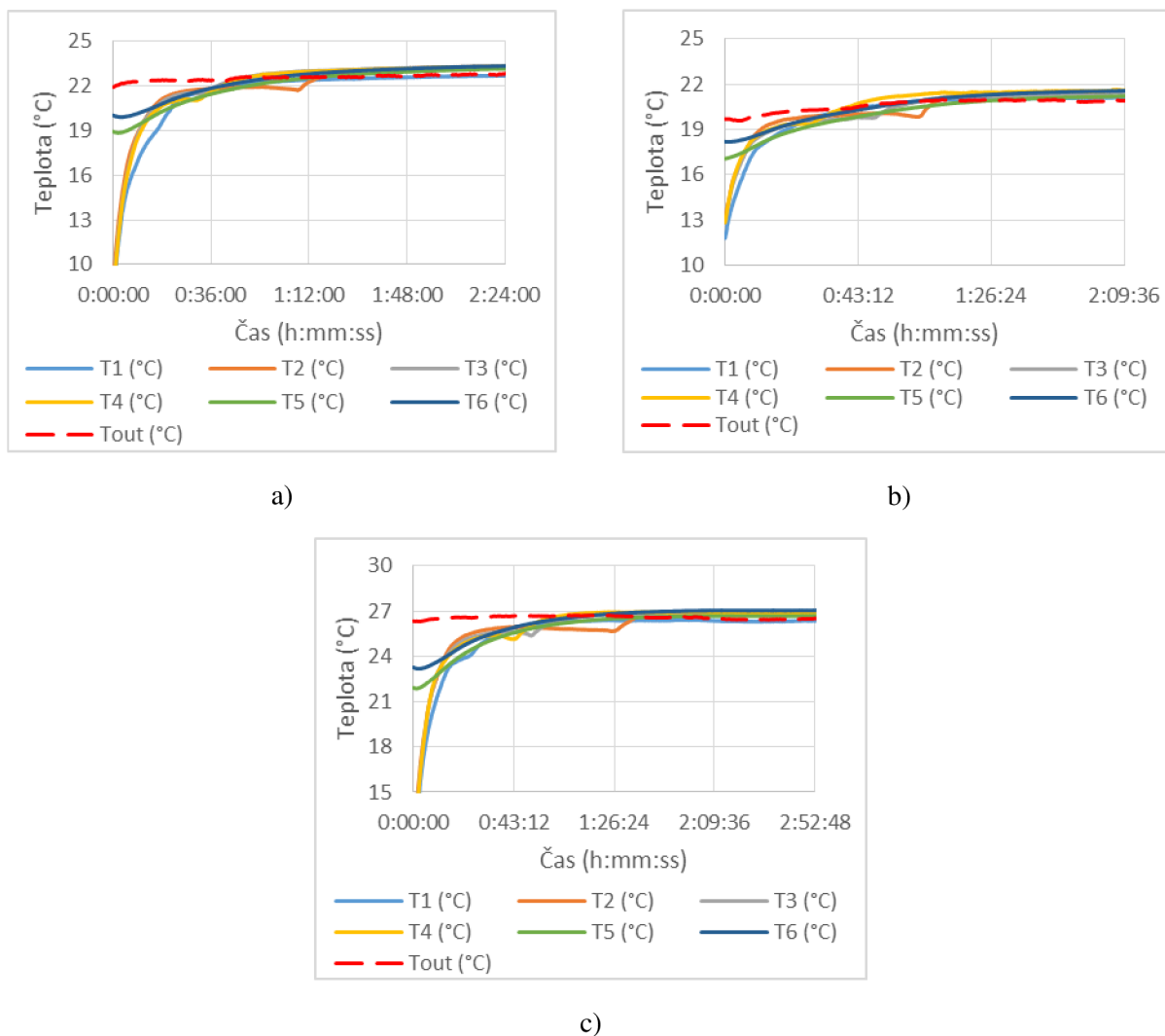
b)



c)

Obr. 2.26 Parametry vzduchu na vstupech (a – V1p60, b – V1,5p60, c – V2p60)

Správným vytemperováním místnosti s měřícím zařízením bylo docíleno, že parametry vstupujícího vzduchu byly během všech měření experimentu konstantní. Z důvodu docílení kvalitních a opakovatelných výsledků bylo nutné, aby teplota v místnosti byla udržena s minimálními výkyvy. Pro měření V1p60 byla teplota místnosti 22,6 °C, V1,5p60 tok 20,6 °C a pro V2p60 tok 26,6 °C.



Obr. 2.27 Teploty světlometu a okolí (a – V1p60, b – V1,5p60, c – V2p60)

Teploty předního skla světlometu (T1 až T4) byly na počátku měření nižší, což bylo způsobeno zchlazením předního skla během zamlžovací fáze experimentu. Během prvních 10 min byly teploty vlivem přirozené konvekce vyrovnány s teplotou v místnosti. Tento jev byl rovněž uvažován během odmlžovací fáze simulace. Teplota předního skla světlometu má důležitou roli pro správné nastavení rychlosti odmlžování numerických simulací, proto musí být brány v úvahu její měnící se hodnoty na začátku odmlžování.

Hlavním výstupem testování odmlžení světlometu bylo časové rozložení kondenzátu. Ovšem pro kvalitní výsledky s dobrou opakovatelností bylo zapotřebí věnovat dostatečné úsilí i zamlžovací fázi (přípravné), která byla citlivá na homogenní prochlazení předního skla. Správný kontakt mezi chladícím médiem a sklem světlometu byl kritický z důvodu nízké tepelné vodivosti, která znesnadňovala rovnoměrné prochlazení v celé chlazené ploše. Do skla byly zabudovány termočlánky, aby bylo možno sledovat teploty během zamlžovací fáze a tím lépe reagovat na výkyvy teplot. Pro hlavní odmlžovací fázi měření bylo důležité dodržení, co nejkonstantnějších podmínek během celého experimentu a to zejména teploty a relativní vlhkosti okolí, což mělo velký vliv na rychlost odmlžování.

2.5. Numerické simulace odmlžování světlometů

Byly zvoleny dva přístupy k výpočtu simulací. V prvním byla dána počáteční podmínka konstantní tloušťky kondenzátu na přední ploše skla, tím bylo možno vynechat celý proces zamlžení světlometu. Měřicí zařízení, proto bylo upraveno a do světlometu byl umístěn malý ventilátor, který byl během zamlžovací fáze zapnut a rozptýlil vypařovanou vlhkost rovnoměrně v celém vnitřním prostoru světlometu (viz podkapitola Vývoj měřicího zařízení). Tento přístup byl ovšem nevhodný, jelikož nebylo docíleno konstantního zamlžení, což potvrdilo i porovnání výsledků postupu odmlžení z experimentu a simulace, které nevykazovaly shodu. V dalším přístupu byla v simulaci zahrnuta i část zamlžení a přidána geometrie zvlhčovače, čímž samozřejmě vzrostla časová náročnost celého výpočtu. Výsledné rozložení kondenzátu bylo dáno prouděním uvnitř světlometu, teplotou skla, délkou vypařování a dalšími parametry. S tímto přístupem bylo docíleno výsledků, které byly v dobré shodě s naměřenými daty a jsou prezentovány v této kapitole.

Model simulace obsahuje vnitřní prostor světlometu (fluid doména), přední sklo (solid doména) a zvlhčovač (solid doména). Geometrie světlometu byla přenesena do softwaru ANSYS Fluent with meshing modul pro tvorbu povrchové a objemové výpočetní sítě vnitřního prostoru. Následně byla upravena přidáním zvlhčovače, který byl nezbytný pro zamlžení předního skla. Výsledná síť měla 17,4 miliónů elementů z toho většina byla tetrahedrálních elementů. Jako řešič byl použit ANSYS Fluent 17.2 s nastaveným laminárním viskózním modelem, výpočtem energie, kondenzací řešenou pomocí Eulerian wall film (EWF) a směšování látek (Species Transport), jelikož médium je vlhký vzduch, který byl složen ze vzduchu a vodní páry. Výpočet byl proveden v transientním módu, jelikož bylo důležité zachytit přesně vývoj kondenzátu v čase. Délka časového kroku byla zvolena, aby bylo řešení zkonvergováno do dvaceti iterací na jeden časový krok. Každá simulace byla podle měření rozdělena do tří částí: zamlžení, domlžení a odmlžení.

Tab. 2.3 Nastavení řešiče *Fluentu* všech částí simulace

| Model | Nastavení |
|-----------------------------------|--|
| Viskózní model | Laminární |
| Míchání látek (Species transport) | Difuze energie na vstupech, tepelná difuze |
| Eulerian wall film (kondenzace) | Rovnice hybnosti, energie a změny fáze, konstanty rychlosti kondenzace 5 a vypařování 20 |
| Tlak-rychlost | SIMPLE ¹ |
| Transientní nastavení | Implicitní interpolace 2. řádu |
| Časový krok (s) | 20 (zamlžení a domlžení)/ 60 (odmlžení) |

¹ Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations

Tab. 2.4 Diskretizační schémata Fluentu všech částí simulace

| Veličiny | Schéma |
|------------------|--|
| Gradient | Metoda nejmenších čtverců (Least Squares Cell Based) |
| Hybnost | Protiproudá interpolace 2. řádu |
| H ₂ O | Protiproudá interpolace 2. řádu |
| Energie | Protiproudá interpolace 2. řádu |

- *Zamlžení* - Cílem této fáze bylo docílení zkondenzování vypařované vody ze zvlhčovače na předním skle světlometu. Rychlost vypařování byla řízena změnou příkonu zvlhčovače pomocí plynule nastavitelného laboratorního zdroje. Bylo důležité, aby během zamlžování nestoupla hodnota relativní vlhkosti nad 70 %, jak bylo popsáno na obr. 2.22. Doba nutná pro zamlžení byla zhruba 25 min.
- *Domlžení* - Tato fáze simulací sloužila ke zkondenzování zbytku vypařené vody, která byla v podobě vzdušné vlhkosti ve vnitřním prostoru světlometu. Přední sklo bylo i nadále podchlazováno, až do doby, kdy relativní vlhkost uvnitř světlometu neklesne na 40 %. Těchto podmínek bylo dosaženo za 5 min.
- *Odmllžení* – V poslední části byl do světlometu přiveden vzduch z okolí pomocí odvětrávacích otvorů a začne odmlžování předního skla. Doba trvání byla od 1 h 30 min až do 3 h v závislosti na množství zkondenzované vody.

Konstrukční geometrie světlometu z CAD souboru byla importována do ANSYS Workbench geometry modulu. Zde byla po menších úpravách vytvořena vnitřní (fluid) doména světlometu. Pro tvorbu výpočetní sítě této domény byl použit ANSYS Workbench mesh modul. Výsledná síť má celkem 17 399 137 elementů z toho je 16 792 269 tetrahedrálních pro fluid doménu a 606 868 wedges elementů (přední sklo světlometu) solid doména. Kvalita sítě byla stanovena průměrným zkosením elementů 0,25 a průměrným poměrem šířky k výšce elementů 1,19, což bylo pro tento typ simulací dostatečné.

Detailnější popis byl věnován dvěma hlavním fyzikálním modelům Eulerian wall film a Species Transport použitých při simulování procesu odmlžování automobilových světlometů.

- *Eulerian wall film (EWF)* – je používán pro predikci výskytu tenkých vrstev (filmů) tekutin na různých površích. V našem případě vodní kondenzát. Problém výpočtu kapalinových filmů je možno řešit za pomoci VOF (Volume of fluid method), ovšem výpočetní náročnost tohoto přístupu je značná, proto je používá EWF, který má výrazně nižší výpočetní nároky. Matematický popis zákonů zachování hmoty, hybnosti a energie použitých v EWF jsou uvedeny níže [49].

$$\text{Zákon zachování hmoty} \quad \frac{\partial y_f}{\partial t} + \nabla_s \cdot [y_f \vec{v}_l] = \frac{\dot{m}_s}{\rho_l}, \quad (2.1)$$

kde ρ_l je hustota kapaliny (vody), y_f je výška tekutinového filmu, ∇_s je povrchový gradient (operátor), \vec{v}_l je rychlost tekutinového filmu, \dot{m}_s je zdroj hmoty na jednotkovou stěnu.

$$\text{Zákon zachování hybnosti} \quad \frac{\partial y_f \bar{v}_l}{\partial t} + \nabla_s \cdot [y_f \bar{v}_l \bar{v}_l], \quad (2.2)$$

kde y_f je výška tekutinového filmu, ∇_s je povrchový gradient (operátor), \bar{v}_l je rychlost tekutinového filmu.

$$\text{Zákon zachování energie} \quad \frac{\partial (y_f T_f)}{\partial t} + \nabla_s \cdot (\bar{v}_f y_f T_f), \quad (2.3)$$

kde y_f je výška tekutinového filmu, ∇_s je povrchový gradient (operátor T_f), je průměrná teplota tekutinového filmu, \bar{v}_f je průměrná rychlost tekutinového filmu.

V nastavení EWF modelu byly zvoleny základní možnosti řešení rovnic hybnosti, energie a změny fáze. Dále byly nastaveny konstanty rychlosti kondenzace na 5 a vypařování na 20. Materiál filmu byl voda v kapalně formě a vodní pára v plynném skupenství. Povrchové napětí bylo $0,07194 \text{ n m}^{-1}$. Diskretizační schéma bylo pro čas explicitní interpolace 2. řádu (First-order explicit) a pro zbytek (kontinuita, hybnost, energie) protiproudá interpolace 2. řádu (First-order upwind).

- *Michání látek (Species Transport)* – Tento model byl používán pro míchání a transport různých tekutin, jejich sloučenin a chemických reakcí. Řeší difuzi jednotlivých složek média na základě typu proudění (laminární/turbulentní), lokální koncentrace a teplotního pole ve výpočetní doméně. V našem případě byl použit vlhký vzduch, který byl složen ze vzduchu a vodní páry.

Hlavní složkou proudové domény byl vlhký vzduch. Nese s sebou vodu v podobě páry, která při kontaktu s chladným vnitřním povrchem skla světlometu kondenzuje. Materiál zkondenzovaného filmu tvoří voda v kapalně formě. Pro získání reálného ohřevu plochy s kondenzátem byl zahrnut objem (solid doména) předního skla z polykarbonátu, jehož termofyzikální vlastnosti byly měřeny v rámci doktorského studia autorem práce viz kapitola 2.9 Měření tepelné vodivosti.

Materiály použité při tvorbě simulací.

- *Voda* – byla na vnitřní ploše skla světlometu, kde kondenzovala z vlhkého vzduchu. S konstantními hodnotami parametrů hustoty, tepelné kapacity, tepelné vodivosti, viskozity a latentního tepla. Pouze tlak syté páry byl funkcí teploty.
- *Vodní pára* – Jedna ze složek vlhkého vzduchu, který vyplňoval celý vnitřní prostor světlometu. V modelu byla vodní pára definovaná jako ideální nestlačitelná kapalina, jež má tepelnou hustotu funkcí teploty. Zbytek parametrů měl konstantní hodnoty (tepelná vodivost a viskozita).
- *Vzduch* – byl součástí vlhkého vzduchu a všechny jeho parametry byly konstantní.
- *Polykarbonát* – Je materiálem předního skla světlometu, jehož termofyzikální vlastnosti (hustota a tepelná kapacita) byly konstantní. Tepelná vodivost byla zadána, jako funkce teploty. Postup měření je popsán v kapitole 2.9 Měření tepelné vodivosti.
- *Vlhký vzduch* – byl směsí dvou látek a to vodní páry a vzduchu. Hustota a tepelná kapacita byly vypočítány pomocí mixing law. Zbytek veličin má konstantní hodnotu (tepelná kapacita a viskozita).

Okrajové a počáteční podmínky byly nastaveny vždy podle naměřených dat pro konkrétní experiment.

- *Zamlžování* – Podle měření se nastavily okrajové a počáteční podmínky. obr. 2.20 z přípravné fáze experimentu byla nastavena teplota předního skla světlometu. Dále byla nastavena počáteční teplota vzduchu uvnitř světlometu dle obr. 2.21 a relativní vlhkost, teplota reflektoru a teplota těla

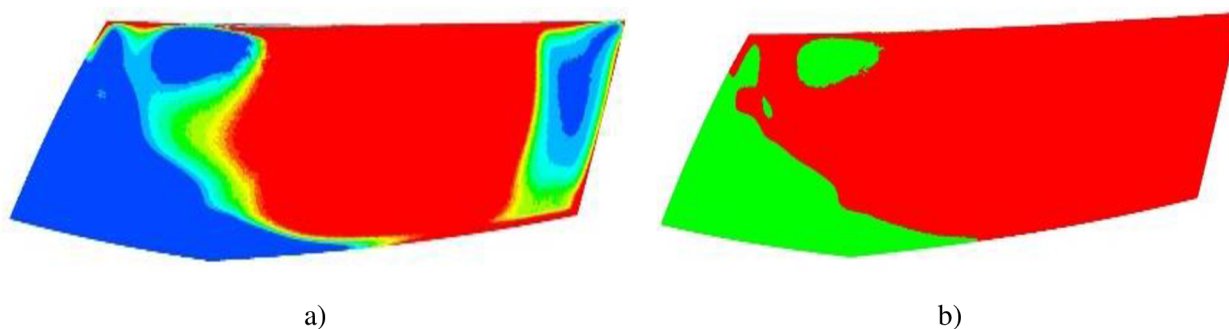
světloometu. Podle doby vypařování a množství vody byl pro jednotlivé experimenty vypočítán hmotnostní tok (mass flow inlet) zvlhčovače.

- *Domlžení* – Po dokončení vypařování bylo následných 5 minut pokračováno v chlazení předního skla. V simulaci byla podmínka hmotnostního toku (mass flow inlet) zvlhčovače změněna na podmínku stěna (wall), teplota stěn zvlhčovače byla vypnuta.
- *Odmízení* – Během poslední části byla geometrie zvlhčovače odstraněna z fluid domény. Vlastnosti solidu zvlhčovače byly změněny na fluid a tím mohl vzduch volně procházet celým zvlhčovačem. Dále byla vypnuta teplota předního skla a na vnější plochu byl nastaven ohřev pomocí součinitele přestupu tepla, jehož hodnota byla výpočtem stanovena na $5 \text{ W m}^{-2}\text{K}^{-1}$. Na odvětrávací otvory 1 až 4 byl přiveden vlhký vzduch o přetlaku 60 Pa, příslušné teplotě a měrná vlhkost pomocí okrajové podmínky přetlak (pressure – inlet). Na poslední odvětrávací otvor byla nastavena podmínka výstup (pressure – outlet).

Porovnání výsledků odmlžení z experimentů a simulací

Z každého experimentu byl pořízen záznam postupu odmlžení přední plochy světloometu v minutových intervalech pomocí kamery. Tyto fotografie byly vyhodnoceny pomocí obrazové analýzy (viz kapitola 2.3 Automatická detekce kondenzátu z fotografií) pro určení zamlžené a odmlžené oblasti.

Okrajové podmínky simulací byly nastaveny podle jednotlivých experimentů. Během odmlžování byla sledována tloušťka zkondenzované vrstvy, která byla zobrazena v různých časech a porovnána s experimenty. Pro přehlednou vizualizaci výsledků kondenzátu ze simulací byly kontury omezeny jen na dvě úrovně s maximální tloušťkou viditelného filmu omezenou na $1e^{-7}$ mm [50].

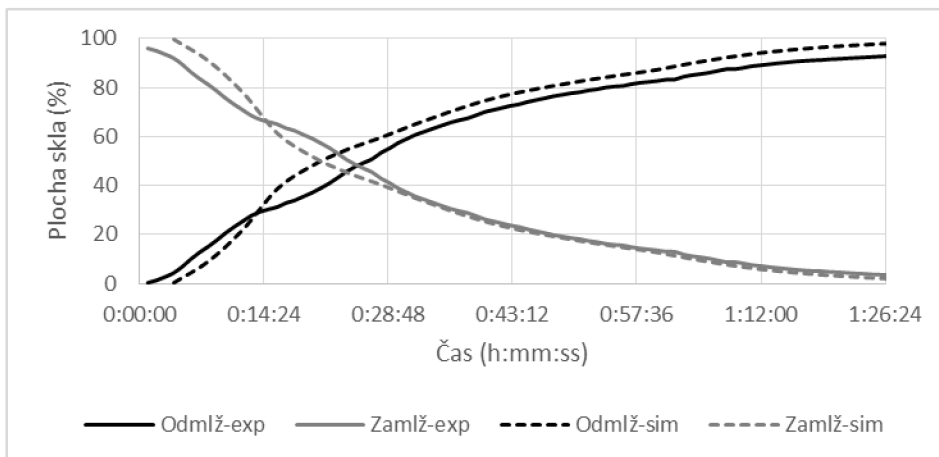


Obr. 2.28 Příklad zobrazení kondenzátu pro V1p60 v 720 sekundě (a – Kontury s plynulým přechodem, b – Dvě úrovně kontur)

Pro detailní porovnání experimentů a simulací byl použit časový záznam zamlžené a odmlžené oblasti přední plochy světloometu, který vznikl z vyhodnocení fotografií experimentů a kontur kondenzátu ze simulací. Na vzniklých křivkách popisující odmlžení světloometu byly zvoleny dva časově význačné okamžiky. První byl okamžik, kdy dojde k překřížení křivek pro odmlženou a zamlženou část. Druhý časový bod byl v okamžiku, kdy křivka zamlžené plochy klesla na 20 %.

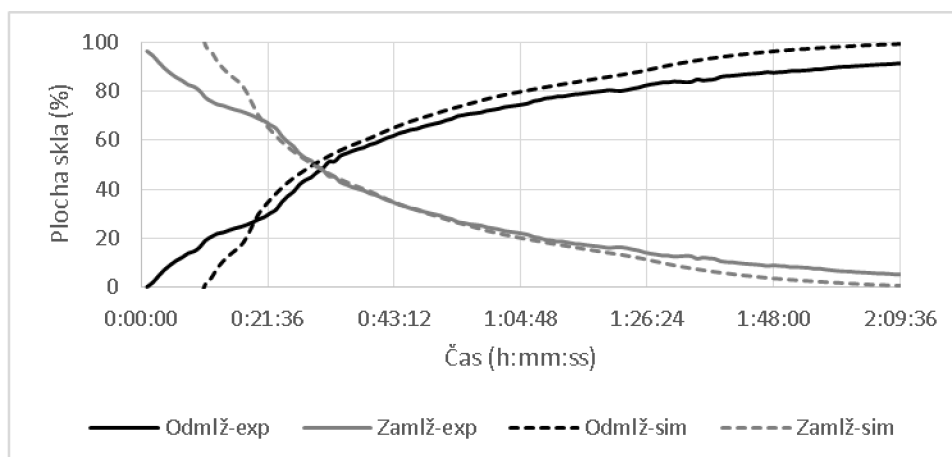
Tab. 2.5 Rozdíl výsledků mezi experimenty a simulacemi

| | V1p60 (h:mm:ss) | | V1,5p60 (h:mm:ss) | | V2p60 (h:mm:ss) | |
|------------|-----------------|-------------|-------------------|-------------|-----------------|-------------|
| | Křížení | Zamlž. 20 % | Křížení | Zamlž. 20 % | Křížení | Zamlž. 20 % |
| Experiment | 0:26:00 | 0:48:00 | 0:31:00 | 1:08:00 | 0:41:00 | 1:17:00 |
| Simulace | 0:21:14 | 0:47:10 | 0:30:00 | 1:06:00 | 0:35:33 | 1:18:34 |
| Odchyłka | 0:04:46 | 0:00:50 | 0:01:00 | 0:02:00 | 0:05:27 | -0:01:34 |



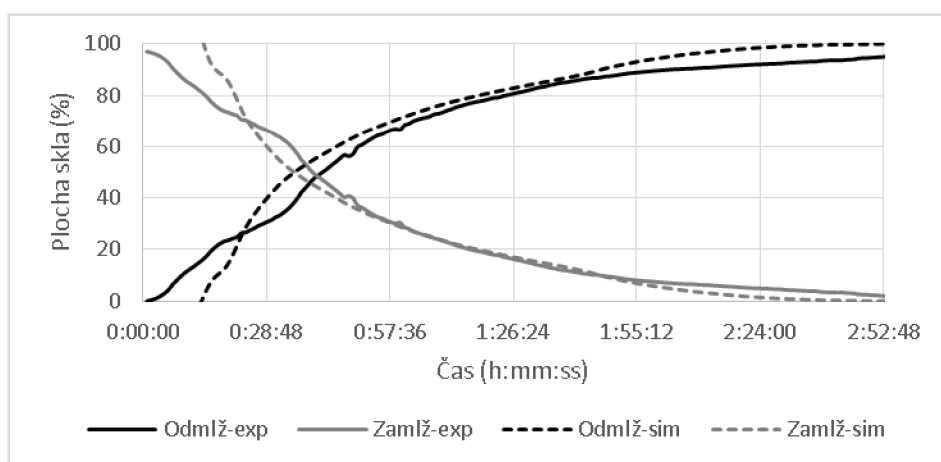
Obr. 2.29 Průběh odmlžení V1p60 a jeho porovnání se simulací

Experiment V1p60 s nejmenším množstvím odpařované vody měl dobrou shodu s numerickým modelem. Na počátku byly patrné odchylky od měření. Ke křížení obou křivek došlo v čase 26 min pro experiment a 21 min 14 sekund pro simulaci, což bylo o 18 % dříve oproti měření. Ovšem po 28 min již byly časové odchylky zanedbatelné. Pro dosažení 20 % zamlžené oblasti bylo v čase 48 min pro experiment a 47 min 10 sekund pro simulaci, což bylo o 2 % rychlejší oproti měření. U křivek odmlžení lze pozorovat stejný průběh s mírným odskočením, které odpovídá zhruba 3,5 %, což byla hodnota nevyhodnotitelné oblasti z fotografií pořízených během experimentu.



Obr. 2.30 Průběh odmlžení V1,5p60 a jeho porovnání se simulací

Simulace i experiment vykazují dobrou shodu časových výsledků průběhu odmlžení. Při bližším pohledu byl patrný rozdíl v úvodní části, v které vykazuje simulace do 19 min jiný charakter. Ovšem při srovnání zbytku záznamu byla shoda s měřením dobrá. Opět byl vidět menší rozdíl mezi křivkami odmlžení. Při vyhodnocování fotografií z měření bylo 3,5 % nevyhodnotitelné plochy předního skla, což způsobuje odchylky mezi porovnávanými výsledky. Ke křížení křivek došlo v čase 31 min pro experiment a 30 min pro simulaci, což bylo o 3 % dříve v porovnání se simulací. Dosažení 20 % zamlžené oblasti bylo v čase 1 h 8 min pro experiment a 1 h 6 min pro simulaci, která byla o 3 % rychlejší. V obou kontrolních bodech byl časový rozdíl malý.



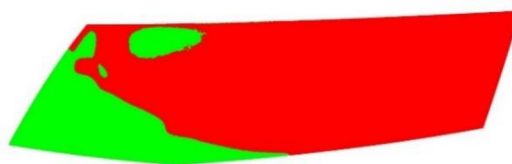
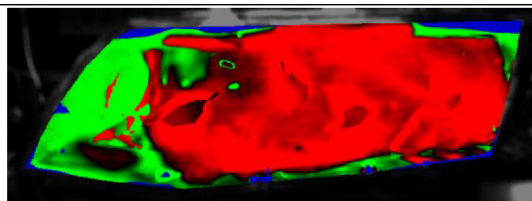
Obr. 2.31 Průběh odmlžení V2p60 a jeho porovnání se simulací

Stejně jako u porovnání pro experiment V1p60 (viz obr. 2.29) vykazuje konfigurace V2p60 stejný průběh v počáteční fázi (do 44 min), kde byl odlišný průběh mezi měřením a simulací. Ke křížení křivek došlo v čase 41 min pro experiment a 35 min 33 sekund pro simulaci, což je o 13 % dříve. Dále je průběh totožný, až na drobné odchylky u křivek pro odmlženou oblast způsobené 3 % nevyhodnotitelnou oblastí z fotografií experimentu. Po dosažení 20 % zamlžené oblasti byl v čase 1 h 17 min pro experiment a 1 h 18 min 34 sekund pro simulaci, která byla o 2 %.

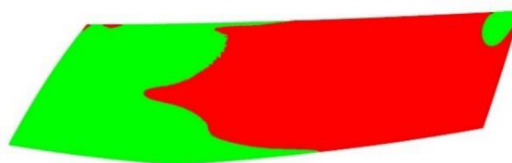
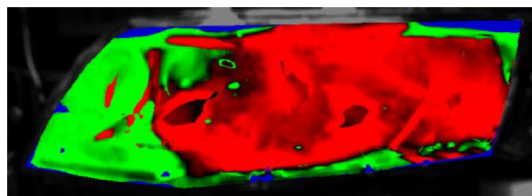
V následujících obrázcích znázorňuje zelená barva odmlženou oblast, červená zamlženou oblast a u fotografií pořízených z měření byla modrá barva, která reprezentovala nevyhodnotitelné oblasti. Ty vznikly z důvodu lokálního přesvětlení vlivem nevhodného odrazu od reflektoru nebo nedostatečným zamlžením krajních míst skla světlometu. Pro přehlednou vizualizaci výsledků kondenzátu ze simulací byly kontury omezeny na dvě úrovně s maximální tloušťkou viditelného filmu stanovenou na $1e^{-7}$ mm [50].

Experiment

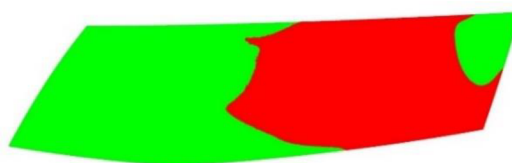
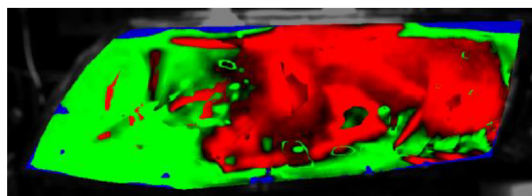
Simulace



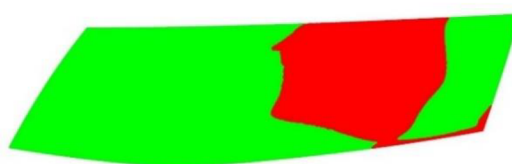
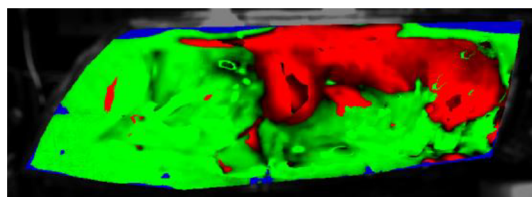
12 min od začátku odmlžování světlometu



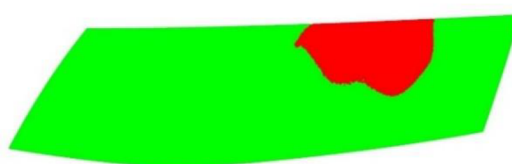
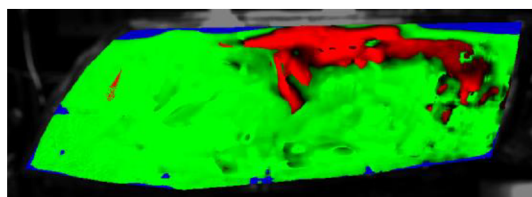
16 min od začátku odmlžování světlometu



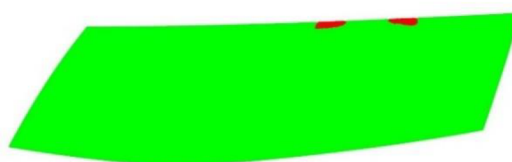
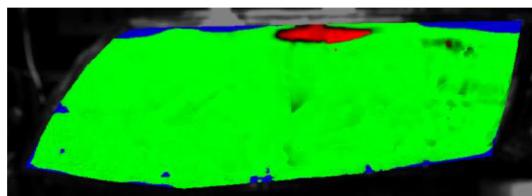
24 min od začátku odmlžování světlometu



36 min od začátku odmlžování světlometu



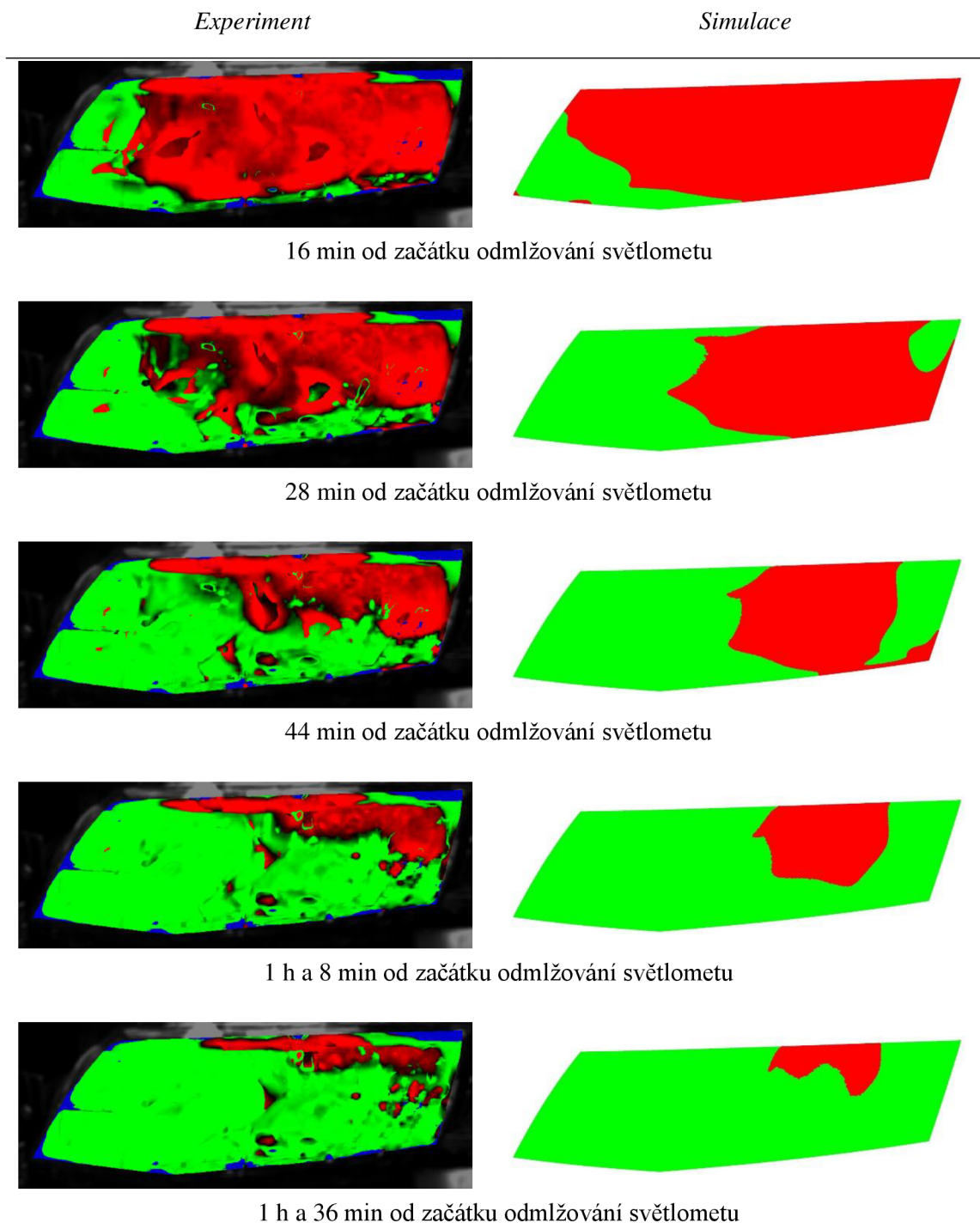
1 h od začátku odmlžování světlometu



1 h a 40 min od začátku odmlžování světlometu

Obr. 2.32 Porovnání výsledků odmlžení z experimentu V1p60 a simulace

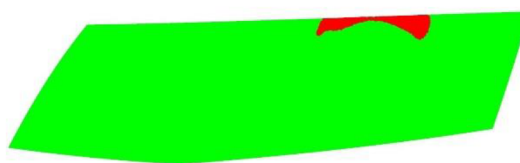
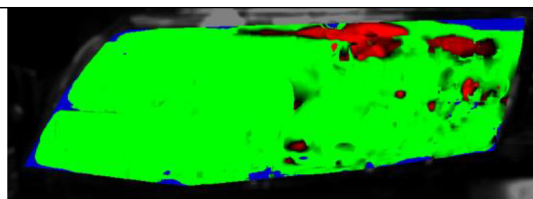
Při vizuálním porovnání výsledků simulací lze pozorovat tendenčně dobrou shodu s experimentem V1p60. Z obou výsledků je patrná pozice zvlhčovače (viz kapitola 2.2 Zvlhčovač - zařízení pro zavádění vlhkosti), před kterým kondenzát zůstává nejdéle, jelikož zde má největší tloušťku. Ovšem při porovnání tvaru hranice kondenzátu jsou patrné odchylky. U experimentu byl kondenzát po delší dobu v levém horním rohu a postupně ustupoval ze spodu nahoru. Kdežto u simulací byl světlomet odmlžen postupně od krajů k místu před zvlhčovačem.



Obr. 2.33 Porovnání výsledků odmlžení z experimentu V1,5p60 a simulace

Experiment

Simulace



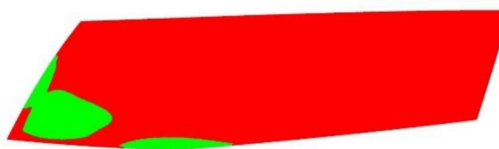
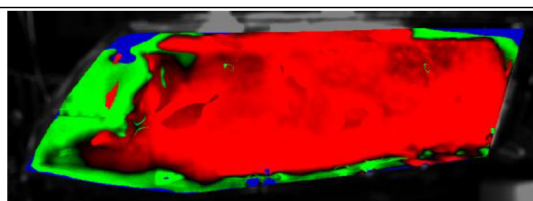
2 h od začátku odmlžování světloometu

Obr. 2.33 Porovnání výsledků odmlžení z experimentu V1,5p60 a simulace

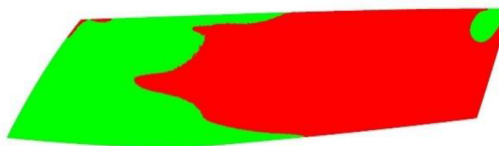
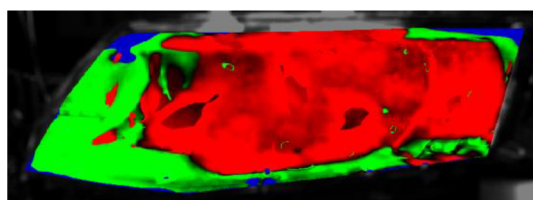
Při vizuálním porovnání výsledků simulací lze pozorovat tendenčně dobrou shodu s experimentem V1,5p60. Rovněž celkový čas simulace odpovídá s experimentem. Opět dochází ke stejným průběhům odmlžení. V případě simulace bylo nejvíce kondenzátu v oblasti před zvlhčovačem viz obr. 2.33 v čase 44 min. Kdežto u měření zůstává nejdéle zamlžená oblast v celém horní části a ustupuje postupně ze spodu na horu.

Experiment

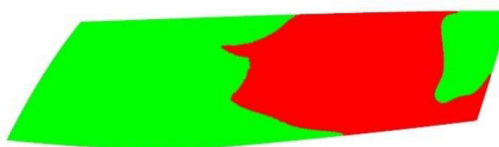
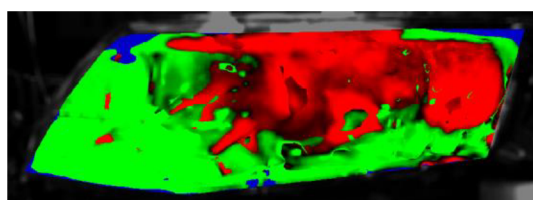
Simulace



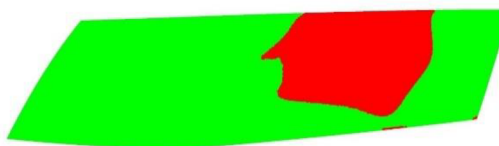
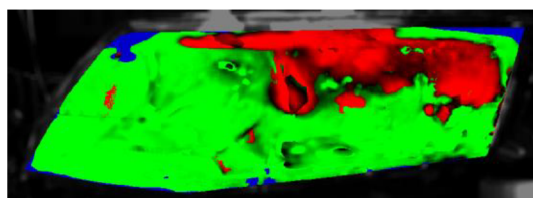
16 min od začátku odmlžování světloometu



28 min od začátku odmlžování světloometu

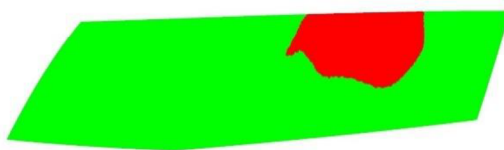
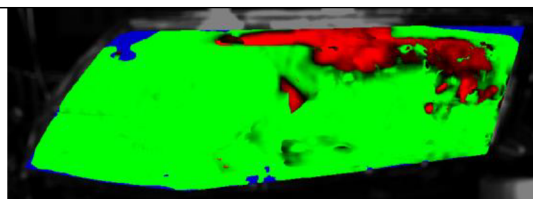


44 min od začátku odmlžování světloometu

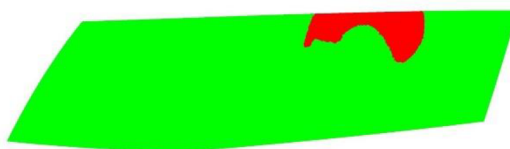
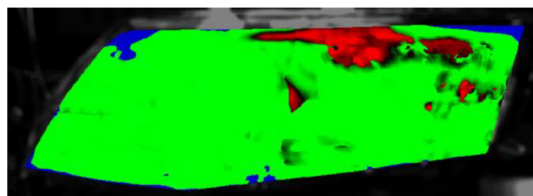


1 h a 8 min od začátku odmlžování světloometu

Obr. 2.34 Porovnání výsledků odmlžení z experimentu V2p60 a simulace



1 h a 36 min od začátku odmlžování světlometu



2 h od začátku odmlžování světlometu

Obr. 2.34 Porovnání výsledků odmlžení z experimentu V2p60 a simulace

Stejně jako u předchozích dvou konfigurací i zde byl stejný rozdíl v postupu odmlžování mezi simulací a experimentem. U simulace kondenzát opět ustupoval od krajů směrem pozici k zvlhčovači, kde byla jeho největší tloušťka. Kdež to experiment bylo patrné, že kondenzát nejdéle zůstává v horní části předního skla a postupně mizel směrem k zvlhčovači.

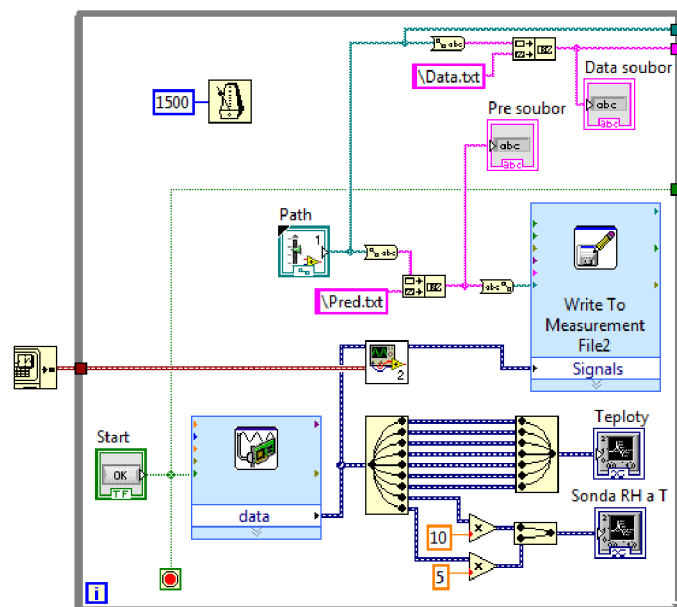
Časové rozložení kondenzace ze simulací a z experimentů není zcela totožné. Ovšem celkový čas odmlžení světlometu a tendence ústupu kondenzátu vykazují dobrou shodu. Odchyly výsledků simulací pro všechny tři konfigurace měření byly pro druhý kontrolní časový okamžik tj. pro 20 % zamlžené plochy předního skla shodné. Rozdíl kolem 3 % vůči měření lze považovat za zanedbatelný. Simulace vykazovaly největší odchyly na počátku, konkrétně do okamžiku zkřížení křivek zamlžené a odmlžené oblasti – viz obr. 2.29, obr. 2.30 a obr. 2.31, proto nelze první minuty simulací použít pro přesný popis reálného stavu. Vzniklé rozdíly výsledků simulací jsou způsobeny převážně použitým zjednodušeným modelem kondenzace (Eulerian wall film) a dále okrajovými podmínkami, které mohou být mírně odlišné od reality. I přes tyto nedostatky lze vytvořené simulace považovat za dobrý nástroj pro odhad potřebného času nutného k odmlžení, proto je lze s výhodou použít pro zmapování a hlavně porovnání četných konfigurací přetlaků na jednotlivých odvětrávacích otvorech a množství odpařované vody. Na základě tohoto porovnání je možno následně vybrat ty nejvhodnější pro otestování pomocí experimentů.

2.6. Program pro ovládání a záznam dat z odmlžovacích testů

První verze měřicího zařízení (viz podkapitola Vývoj měřicího zařízení) byla velice jednoduchá na ovládání, pouze byly vyčítány hodnoty napětí ze čtyř diferenčních tlakoměrů. Ovšem postupem času bylo zařízení doplňováno o nové senzory a funkce. Bylo přidáno měření teploty okolí, záznam fotografií, vypínání/zapínání osvětlovacích žárovek, sonda relativní vlhkosti a teploty do světloometu atd. Proto byly i vyšší nároky na správnou synchronizaci všech komponentů. Z tohoto důvodu byl, již od začátku použit měřicí hardware a software od americké společnosti National Instruments, která poskytuje modulární měřicí prvky a rovněž grafické vývojové prostředí pro návrh měřicích systémů pomocí LabView (LV) nebo zjednodušené verze SignalExpress (SE). Pro počáteční testy postačovalo použití SE, ale přidávání další funkcionality již bylo zapotřebí sestavit zcela nový a značně náročnější program pro ovládání, zobrazení a záznam naměřených dat z experimentu. Jádrem je tzv. blokové schéma, které umožňuje naprogramovat funkcionalitu ovládacího programu dle požadavků daného měření. Zobrazení ovládacích prvků programu (např.: start, stop, frekvence záznamu dat, ukládání souboru s naměřenými daty, atd.) a aktuální hodnoty měřených veličin jsou v uživatelském rozhraní.

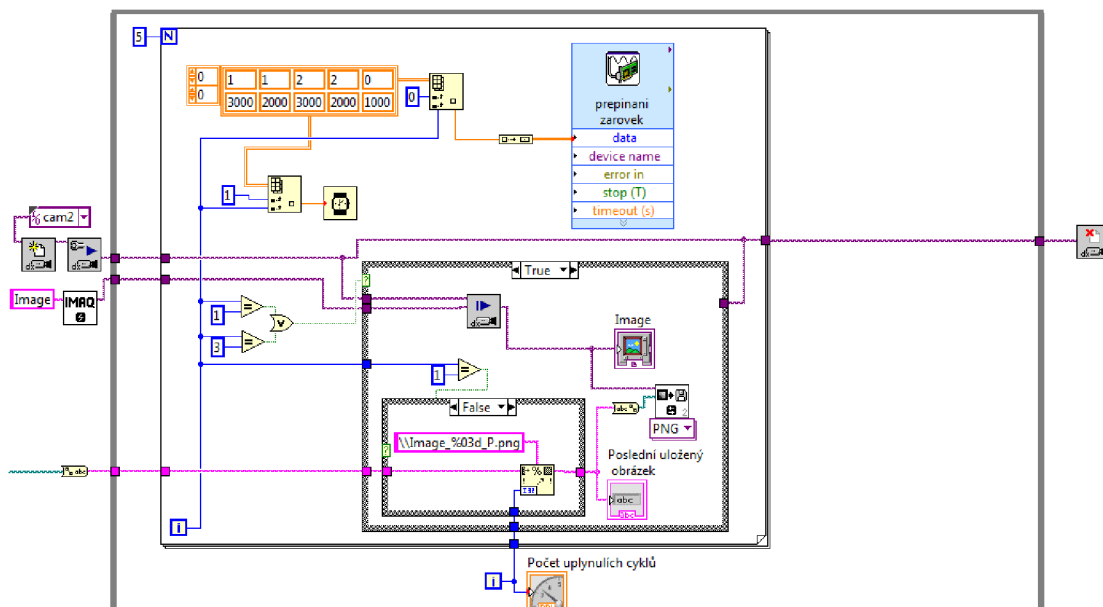
Finální ovládací program se skládá ze čtyř bloků.

- *První blok* měl za úkol záznam a zobrazení dat ze zamlžovací a odmlžovací fáze, které slouží pro správné nastavení okrajových a počátečních podmínek nutných pro dosažení, co nejměnějšího rozložení kondenzátu v simulaci. Tyto části mají zásadní vliv na dosažený výsledek v podobě odmlžování skla světloometu. Jedná se o: teploty reflektoru (T_5 a T_6), teploty předního skla světloometu (T_1 až T_4), sondu zabudovanou do vnitřního prostoru světloometu, jejímž výstupem je napětí, které je přepočítáno v programu na relativní vlhkost a teplotu (RH_{in} a T_{in}). Dále teplota okolí měřená odporovým teploměrem PT100 (T_{out}) a nakonec napětí zvlhčovače, ze kterého se následně dopočítal příkon (P). Frekvence záznamu dat byla 1,5 sekund.



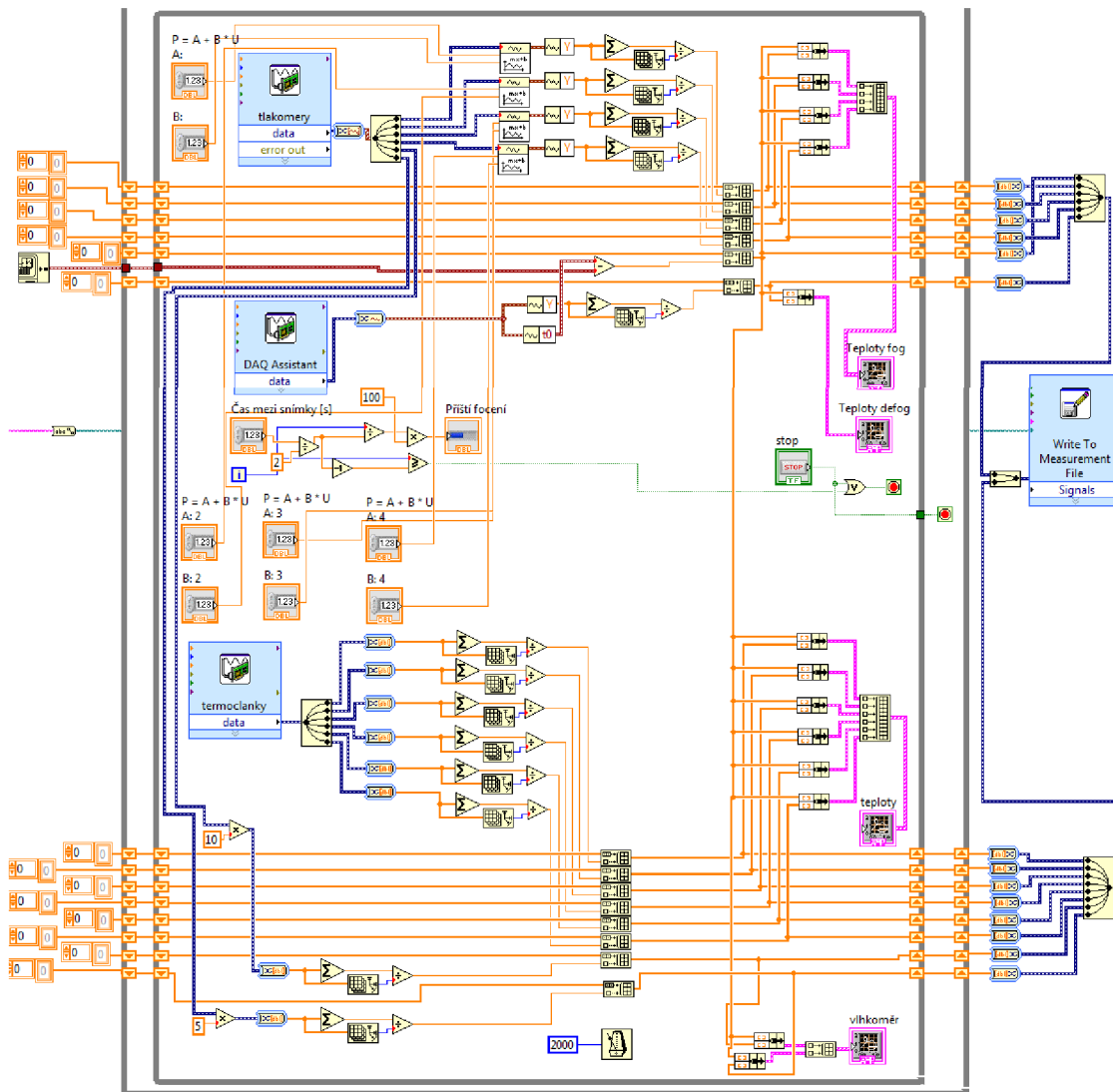
Obr. 2.35 Blokové schéma prvního celku ovládacího programu

- *Druhý blok* byl spuštěn po dokončení zamlžení a domlžení. Následně byl světlomet očištěn od kapek vody z vnějšku. Účelem tohoto celku bylo v požadovaných časových intervalech ovládat osvětlovací žárovky a jejich přepínání v rychlém sledu za sebou. Zároveň pořizování dvou fotografií s různým osvětlením kondenzátu. Dále pořizování fotografií nutných pro následnou programovou detekci zamlžené a odmlžené oblasti předního skla. Bližší popis tohoto postupu je v následující kapitole.



Obr. 2.36 Blokové schéma druhého celku ovládacího programu

- *Třetí blok* byl spuštěn zároveň s druhým celkem a jeho úkolem bylo zobrazení měřených dat. Teplotu okolí měřenou odporovým teploměrem PT100 (T_{out}), teploty reflektoru (T_5 a T_6), teploty předního skla světlometu (T_1 až T_4). Dále napětí ze sondy zabudované do vnitřního prostoru světlometu, jenž bylo přepočítáno v programu na relativní vlhkost a teplotu (RH_{in} a T_{in}).
- *Čtvrtý blok* sloužil pro sběr a záznam měřených veličin ve zvoleném časovém intervalu 2 sekund z třetího celku. Pro každý záznam je pomocí odečtu ukončení třetího celku i čas pořízení dat.



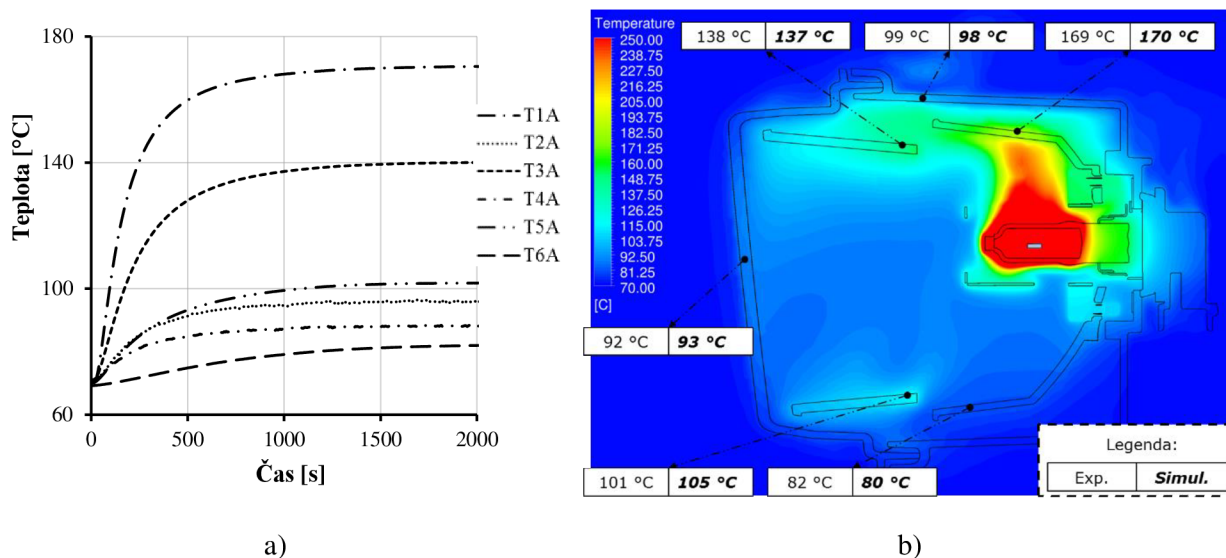
Obr. 2.37 Blokové schéma třetího a čtvrtého celku ovládacího programu

Byl prováděn i záznam parametrů vzduchu vstupujícího do odvětrávacích otvorů světlometu. Ten byl prováděn externě pomocí ručního datalogeru (Omega RHXL3SD) se sondou pro měření teploty a relativní vlhkosti. Spuštění bylo synchronizováno ručně se startem měřicího programu. Frekvence záznamu dat byla 10 sekund.

Celé ovládací a měřicí prostředí bylo sestaveno za pomoci grafického vývojového prostředí LabView. Čímž byla zaručena velmi dobrá synchronizace měřených dat. Další výhodou bylo on-line zobrazení měřených hodnot, což bylo důležité hlavně pro sledování teplot předního skla při kondenzaci vody vypařované ze zvlhčovače a kontrolu relativní vlhkosti uvnitř světlometu během přípravné fáze experimentu. Rovněž ovládání procesu pořizování fotografií, kdy bylo nutné v minutových intervalech pořizovat dvě fotografie a střídavě zapínat světelné zdroje, nutné pro správné osvětlování kondenzátu.

2.7. Měření teplotního zatížení světlometů

K výrobě komponent automobilových světlometů jsou používány převážně plastové materiály, proto jsou i měřené teploty pohybují na nízké úrovni od pokojové teploty do 180 °C v blízkosti světelných zdrojů. Z tohoto důvodu je důležité zvolit nejvhodnější typ termočlánků pro aplikace na světlometech a vhodnou metodu zabudovávání do měřených míst. Zabudování termočlánků má kritický vliv na změřené výsledky. Na výsledné naměřené teploty má vliv druh měřeného materiálu, reflektance povrchu a elektrickém příkonu světelného zdroje (žárovky nebo LED) [41], [40]. Plast má nízkou tepelnou vodivost s přibližnou hodnotou kolem $0,2 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$, proto špatně zabudovaný termočlánek může způsobit vyšší absorpci tepla vlivem záření ze světelného zdroje. Toto zvýšené množství tepelné energie je kumulováno v blízkosti měřeného místa vlivem nízké tepelné vodivosti a způsobuje zvýšení měřené teploty.

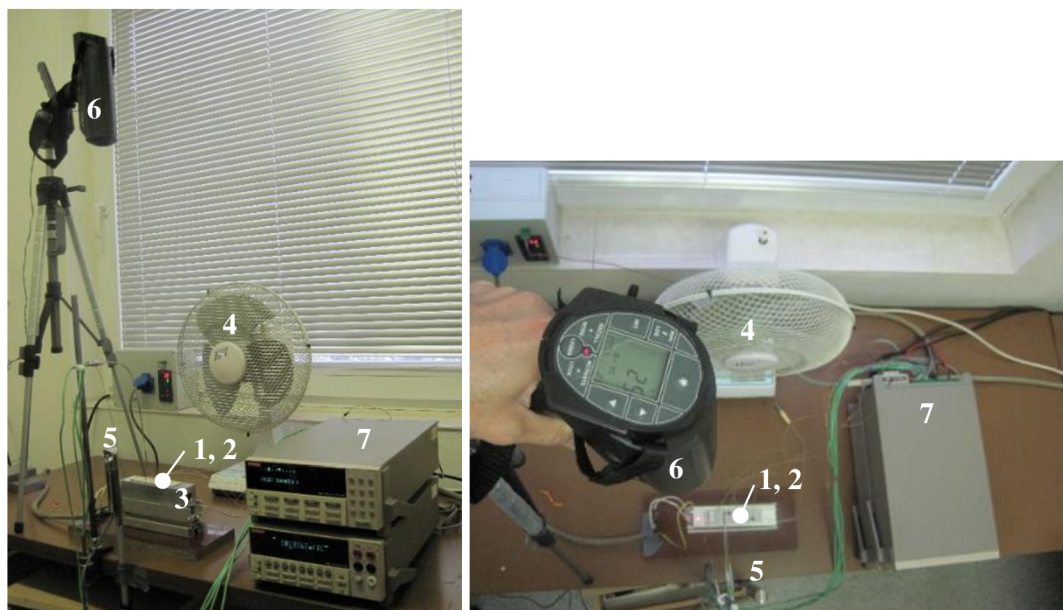


Obr. 2.38 Příklad výsledků (a – Měření pomocí termočlánků zabudovaných ve světlometu, b – Vypočítané teplotní pole z numerických simulací a jeho porovnání s experimentem)

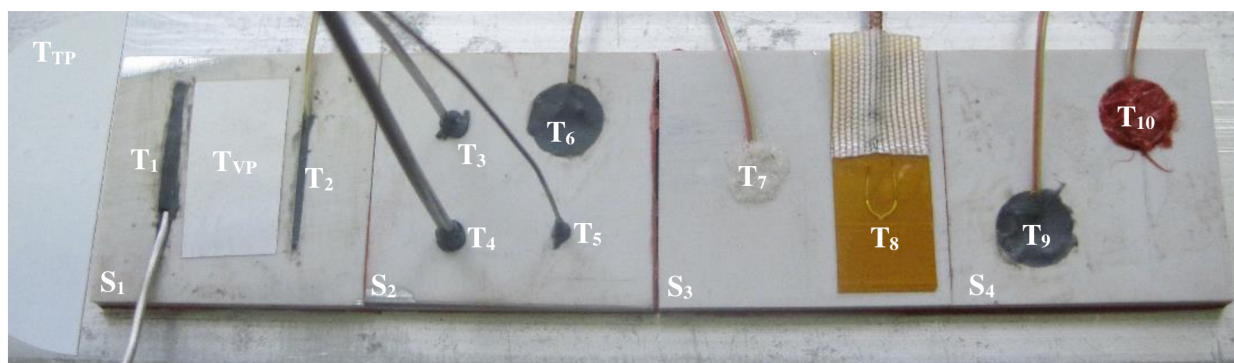
Studie vlivu zabudování termočlánku na měřené teploty

Cílem studie bylo ukázat na měřených teplotách vliv zabudování termočlánků při použití různých konstrukčních provedení termočlánků K – viz obr. 2.39. Měřený vzorek 1 se zabudovanými termočlánky 2 byl ohříván na konstantní teplotu pomocí regulovatelného topného tělesa 3 a ze strany ofukován ventilátorem 4. Rychlost proudění vzduchu kolem měřených vzorků 1 byla sledována anemometrem 5, který byl umístěn ve směru proudění. Povrchová teplota vzorků 1 a topení 3 byla měřena pomocí pyrometru 6, který byl umístěn nad vzorky 1. Pro lepší prezentaci vlivu zabudování termočlánků 2 bylo proměřeno šest úrovní teploty vzorků 1 (60, 80, 100, 120, 140, 160 a 180) °C. Každá úroveň byla změřena ve dvou režimech a to s vypnutým ventilátorem 4 (přirozená konvekce) a se zapnutým ventilátorem 2 m s^{-1} (nucená konvekce). Data byla zaznamenávána pomocí multimetru 7 (Keithley - Model 2000 multimeter), který zaznamenával hodnotu milivoltů z jednotlivých termočlánků a následně uložil do počítače.

Pro připevnění termočlánků do měřicích míst byly použity Loctite EA 9492 vysokoteplotně odolný dvousložkový epoxid s maximální teplotou do 180 °C, Loctite 424 vteřinové lepidlo s teplotní odolností do 80 °C a Loctite SI 5920 silikónová pasta (s příměsí mědi) s teplotní odolností do 350 °C.

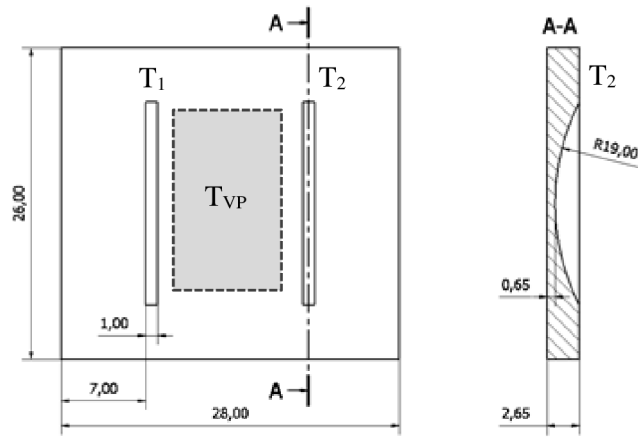


Obr. 2.39 Sestava experimentu (1 vzorek, 2 termočlánky, 3 topení, 4 ventilátor, 5 anemometr, 6 pyrometr, 7 multimetr)



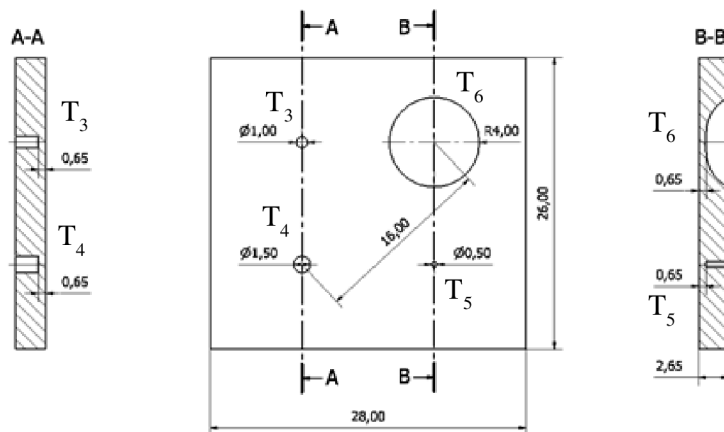
Obr. 2.40 Testovací vzorky se zabudovanými termočlánky

Pro testování byly připraveny čtyři duralové vzorky (S_1 až S_4), které měly různě konstruované drážky a díry pro vložení termočlánků – viz obr. 2.41, obr. 2.42, obr. 2.43 a obr. 2.44. Většina termočlánků měla měřicí část umístěnou ve stejné hloubce 2 mm povrchem, pouze zbylé dva T_7 a T_8 byly přilepeny přímo na povrch. Teplota vzorků byla nastavována pomocí topení se zabudovaným termočlánkem a kontrolována bezkontaktním měřením povrchové teploty (T_{TP}) pomocí pyrometru. Pro tyto účely byla na povrch topení nalepena páska o známé emisivitě.



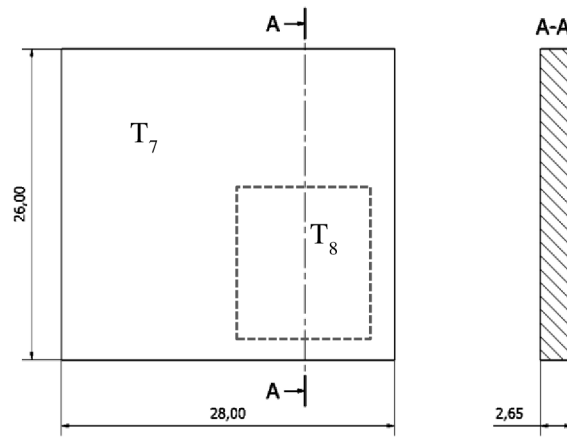
Obr. 2.41 Rozměry vzorku S1

V prvním vzorku byly zabudovány dva termočlánky. Plášťový termočlánek T_1 o průměru 1 mm a termočlánek s teflonovou izolací T_2 o průměru 0,25 mm, které byly vloženy do vyřezaných drážek a následně zalepeny dvousložkovým epoxidem (Loctite EA 9492). Mezi nimi byla nalepena páska o známé emisivitě pro bezkontaktní měření povrchové teploty vzorku (T_{VP}) pomocí pyrometru.



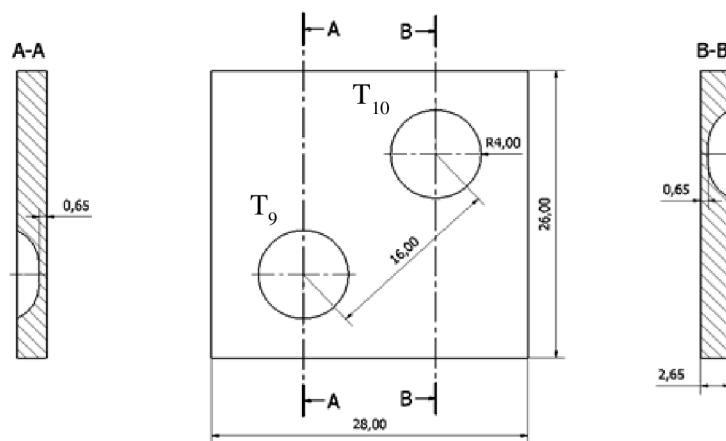
Obr. 2.42 Rozměry vzorku S2

Druhý vzorek měl zabudované čtyři termočlánky. Tři plášťové termočlánky: T_3 o průměru 1 mm, T_4 o průměru 1,5 mm a T_5 o průměru 0,5 mm. Poslední termočlánek T_6 byl teflonovou izolací o průměru 0,25 mm. Termočlánky T_3 až T_5 jsou vloženy do vyvrtaných děr, jejichž průměr je shodný s vnějším průměrem příslušného termočlánku. Zbývající T_6 byl vložen do výřezu tvaru kulového vrchlíku. Pro zalepení byl použit dvousložkový epoxid (Loctite EA 9492).



Obr. 2.43 Rozměry vzorku S3

Třetí vzorek v sobě neměl žádnou díru ani zářez pro vsunutí termočlánků, proto byly nalepeny přímo na povrch vzorku. Termočlánek s teflonovou izolací \varnothing 0,25 mm T₇ byl přilepen pomocí vteřinového lepidla (Loctite 424). Nalepovací termočlánek T₈ byl přilepen přes svou nalepovací plochu pro první měření a při druhém měření byl znovu přilepen pomocí vteřinového lepidla (Loctite 424).



Obr. 2.44 Rozměry vzorku S4

Poslední čtvrtý vzorek měl dva totožné termočlánky, které jsou vloženy do výřezů tvaru kulového vrchlíku. Termočlánky s teflonovou izolací T₉, T₁₀ o průměru 0,25 mm. Rozdíl byl v použitém lepidle. Pro přilepení T₉ byl použit dvousložkový epoxid (Loctite EA 9492). Pro T₁₀ bylo použito u prvního měření vteřinové lepidlo (Loctite 424) a pro druhé měření silikónová pasta (Loctite SI 5920).

Tab. 2.6 Popis zabudovaných termočlánků typu – K

| Označení | Metoda / Senzor | Upevnění |
|-----------------|---|-------------------------------|
| T _{TP} | Povrchová teplota topení, měřena pyrometrem | |
| T _{VP} | Povrchová teplota vzorku, měřena pyrometrem | |
| T ₁ | Plášťový termočlánek ø 1 mm | Epoxid |
| T ₂ | Termočlánek s teflonovou izolací ø 0,25 mm | Epoxid |
| T ₃ | Plášťový termočlánek ø 1 mm | Epoxid |
| T ₄ | Plášťový termočlánek ø 1,5 mm | Epoxid |
| T ₅ | Plášťový termočlánek ø 0,5 mm | Epoxid |
| T ₆ | Termočlánek s teflonovou izolací ø 0,25 mm | Epoxid |
| T ₇ | Termočlánek s teflonovou izolací ø 0,25 mm | Vteřinové lepidlo + aktivátor |
| T ₈ | Nalepovací termočlánek | Vlastní lepicí plocha |
| T ₉ | Termočlánek s teflonovou izolací ø 0,25 mm | Epoxid |
| T ₁₀ | Termočlánek s teflonovou izolací ø 0,25 mm | Vteřinové lepidlo + aktivátor |

Byly provedeny dvě měření se stejným rozsahem měřených teplot topení od 60 °C do 180 °C, přičemž každá teplota byla měřena s vypnutým (přirozená konvekce) a zapnutým (nucená konvekce) ventilátorem – viz tab. 2.7 a tab. 2.8. Byl zvolen referenční termočlánek T₂, který díky své konstrukci a způsobu zabudování do měřeného materiálu dává výsledky, které byly nejbližší reálné teplotě vzorku.

Tab. 2.7 Teploty (°C) na jednotlivých termočláncích, první měření

| v (m s ⁻¹) | T _T | T _{TP} | T _{VP} | T ₁ | T ₂ (T-ref) | T ₃ | T ₄ | T ₅ | T ₆ | T ₇ | T ₈ | T ₉ | T ₁₀ |
|---------------------------|----------------|-----------------|-----------------|----------------|---------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|-----------------|
| 0 | 60 | 56 | 53 | 56,5 | 57,6 | 51,3 | 47,2 | 55,4 | 57,1 | 55,0 | 56,1 | 58,0 | 57,0 |
| 2 | 60 | 55 | 45 | 51,3 | 53,0 | 38,8 | 35,7 | 47,6 | 51,7 | 47,2 | 49,7 | 54,6 | 52,8 |
| 0 | 80 | 75 | 70 | 75,4 | 76,8 | 67,5 | 60,5 | 73,4 | 75,9 | 72,8 | 74,2 | 77,3 | 76,1 |
| 2 | 80 | 74 | 61 | 69,1 | 71,3 | 50,2 | 45,2 | 62,9 | 69,0 | 62,1 | 65,3 | 72,6 | 70,0 |
| 0 | 100 | 94 | 87 | 93,2 | 94,3 | 82,8 | 76,5 | 90,6 | 92,8 | 89,4 | 90,6 | 94,5 | 93,4 |
| 2 | 100 | 92 | 75 | 85,0 | 87,7 | 60,6 | 54,1 | 76,7 | 84,6 | 75,7 | 79,2 | 88,5 | 85,4 |
| 0 | 120 | 113 | 103 | 109,7 | 110,9 | 95,0 | 89,3 | 106,2 | 108,7 | 103,6 | 104,1 | 110,8 | 109,3 |
| 2 | 120 | 112 | 86 | 100,2 | 103,9 | 70,8 | 62,8 | 90,7 | 99,9 | 88,9 | – ² | 102,8 | 100,7 |
| 0 | 140 | 132 | 118 | 125,1 | 127,1 | 107,9 | 99,7 | 119,6 | 122,6 | 117,7 | – | 125,5 | 124,7 |
| 2 | 140 | 130 | 100 | 113,4 | 118,0 | 78,5 | 69,5 | 101,5 | 109,0 | 101,3 | – | 116,7 | 115,7 |
| 0 | 160 | 151 | 133 | 140,3 | 141,0 | 120,0 | 112,5 | 134,5 | 137,4 | 129,1 | – | 140,4 | 139,2 |
| 2 | 160 | 149 | 105 | 127,5 | 131,6 | 88,1 | 77,5 | 113,7 | 124,2 | 109,9 | – | 131,3 | 127,7 |
| 0 | 180 | 170 | 147 | 152,8 | 156,9 | 132,0 | 124,5 | 147,3 | 151,3 | 138,9 | – | 154,1 | – ³ |
| 2 | 180 | 167 | 113 | 133,7 | 146,9 | 95,0 | 84,2 | 123,2 | 136,1 | 115,4 | – | 142,8 | – |

² Termočlánek T₈ se v průběhu měření odlepil vlivem vysoké teploty měřeného materiálu, která byla mimo dovolený rozsah lepicí hmoty.

³ Termočlánek T₁₀ se v průběhu měření odlepil vlivem vysoké teploty měřeného materiálu, která byla mimo dovolený rozsah vteřinového lepidla Loctite 424 s teplotní odolností do 80 °C.

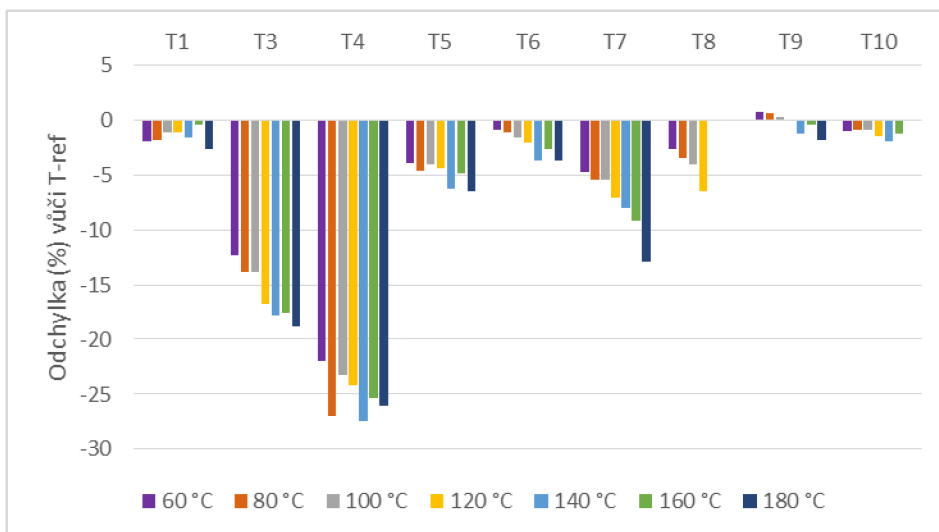
Tab. 2.8 Teploty (°C) na jednotlivých termočláncích, druhé měření

| v (m s ⁻¹) | T _T | T _{TP} | T _{VP} | T ₁ | T ₂ (T-ref) | T ₃ | T ₄ | T ₅ | T ₆ | T ₇ | T ₈ ⁴ | T ₉ | T ₁₀ ⁵ |
|---------------------------|----------------|-----------------|-----------------|----------------|---------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|-----------------------------|----------------|------------------------------|
| 0 | 60 | 57 | 53 | 56,5 | 58,2 | 52,7 | 50,3 | 56,0 | 57,1 | 54,6 | 55,5 | 57,9 | 57,5 |
| 2 | 60 | 56 | 45 | 50,2 | 54,3 | 41,2 | 38,4 | 48,2 | 52,0 | 46,4 | 48,7 | 53,6 | 54,0 |
| 0 | 80 | 76 | 69 | 73,9 | 76,6 | 68,1 | 64,3 | 73,0 | 74,7 | 71,0 | 72,2 | 75,8 | 75,1 |
| 2 | 80 | 75 | 57 | 64,4 | 70,8 | 50,4 | 46,4 | 61,3 | 67,0 | 58,7 | 62,1 | 69,6 | 70,2 |
| 0 | 100 | 95 | 85 | 90,4 | 94,0 | 82,5 | 75,4 | 88,8 | 91,6 | 85,9 | 87,9 | 92,6 | 92,1 |
| 2 | 100 | 94 | 70 | 79,4 | 87,5 | 61,6 | 55,8 | 75,4 | 82,5 | 71,7 | 76,1 | 85,4 | 86,3 |
| 0 | 120 | 114 | 101 | 107,0 | 110,5 | 96,3 | 89,6 | 104,3 | 107,4 | 100,2 | 102,3 | 109,2 | 108,2 |
| 2 | 120 | 112 | 80 | 92,2 | 102,7 | 68,5 | 61,9 | 86,3 | 94,7 | 81,1 | 87,5 | 99,7 | 100,5 |
| 0 | 140 | 132 | 116 | 122,4 | 126,1 | 108,7 | 102,8 | 119,7 | 122,3 | 113,8 | 116,2 | 124,8 | 123,8 |
| 2 | 140 | 130 | 93 | 105,9 | 117,7 | 77,2 | 69,7 | 98,5 | 107,4 | 92,9 | 100,4 | 113,9 | 115,1 |
| 0 | 160 | 152 | 130 | 137,0 | 142,7 | 122,8 | 110,5 | 133,4 | 137,5 | 127,1 | 131,0 | 139,6 | 138,9 |
| 2 | 160 | 149 | 101 | 118,0 | 132,4 | 85,4 | 76,2 | 110,4 | 120,4 | 104,1 | 112,7 | 128,4 | 129,4 |
| 0 | 180 | 171 | 145 | 151,9 | 157,9 | 136,7 | 123,5 | 147,8 | 152,0 | 138,8 | 144,4 | 154,9 | 152,7 |
| 2 | 180 | 167 | 111 | 131,1 | 145,2 | 93,9 | 83,8 | 121,1 | 135,7 | 112,4 | 124,2 | 144,3 | 142,4 |

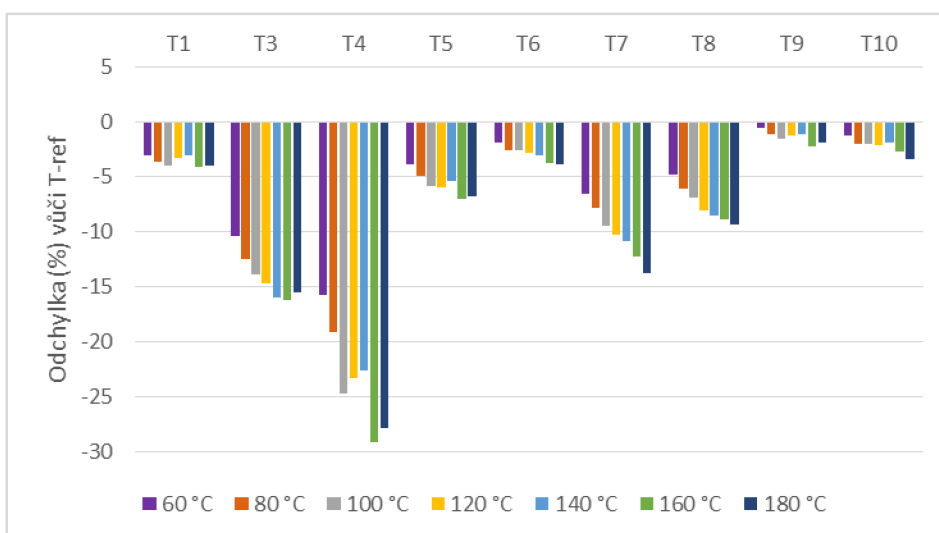
Pro názorné porovnání zabudovaných termočlánců byly všechny měřené teploty srovnávány s referenční teplotou T₂. Následující grafy v obr. 2.45, obr. 2.46, obr. 2.47 a obr. 2.48 jsou teploty zobrazeny v procentuální odchylce od referenční teploty T₂. Tento termočlánek byl zvolen, jelikož je nejvhodněji zabudovaný do vzorku. Z naměřených teplot je patrné, které způsoby zabudování termočlánců dosahují dobrých výsledků a které jsou zcela nevhodné. Kladná hodnota odchylky je pro teplotu, která je vyšší, než teplota T₂. Záporná hodnota odchylky je pro teplotu nižší, než je teplota T₂.

⁴ Termočlánek T₈ se během prvního měření odlepil vlivem vysokých teplot, proto byl pro druhé měření znovu přilepen přes celou kontaktní plochu vteřinovým lepidlem (Loctite 424).

⁵ Termočlánek T₁₀ se během prvního měření odlepil, proto byl pro druhé měření znovu zalepen pomocí silikónové pasty (Loctite SI 5920).

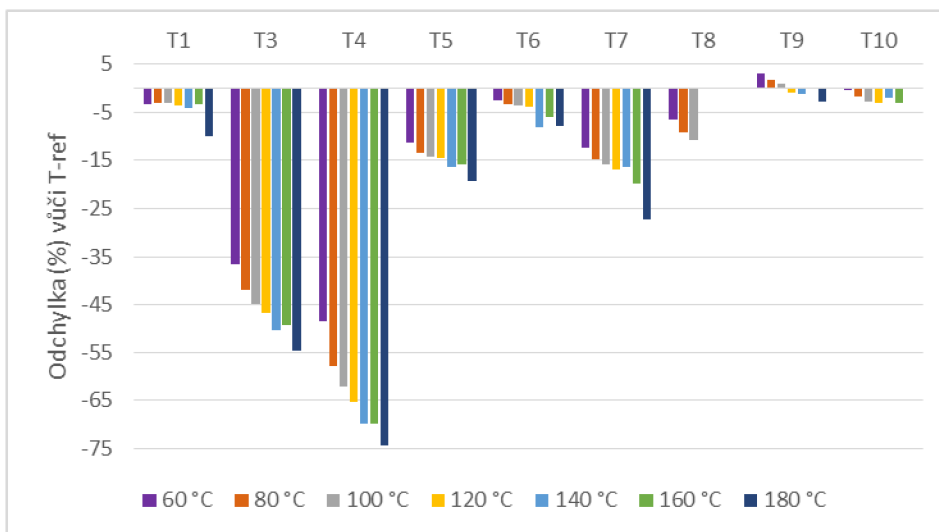


Obr. 2.45 Odchylky teplot (%) vůči T_2 pro první měření, přirozená konvekce

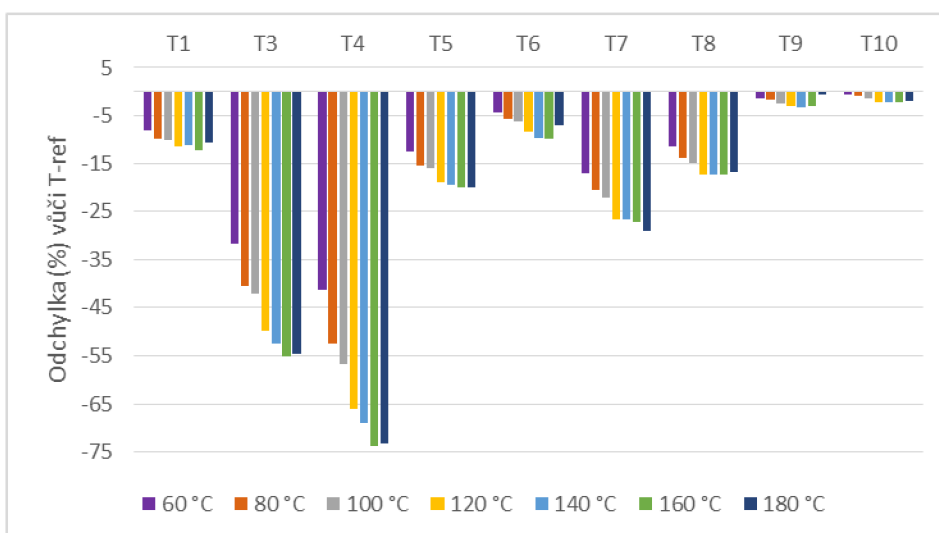


Obr. 2.46 Odchylky teplot (%) vůči T_2 pro druhé měření, přirozená konvekce

Výsledky pro přirozenou konvekci vykazují relativně nízké hodnoty odchylky. Většina termočlánků měla měřenou teplotu do 5 % nižší než T_2 . Největší odchylky dosahovaly T_3 a T_4 , které měří teploty až o 25 % nižší. Pro přirozenou konvekci není zcela patrné, které termočlánky jsou nevhodně zabudované, jelikož odchylky od referenční teploty byly malé. U T_3 a T_4 , výsledky naznačují nevhodnost zabudování.



Obr. 2.47 Odchylky teplot (%) vůči T_2 pro první měření, nucená konvekce 2 m s^{-1}



Obr. 2.48 Odchylky teplot (%) vůči T_2 pro druhé měření, nucená konvekce 2 m s^{-1}

U nucené konvekce se ve větší míře projeví vliv zabudování termočlánků. Nevhodnost zabudování je zesílena vyšší rychlostí obtékajícího vzduchu. Odchylky od referenčního T_2 byly standardně o 5 % až 15 % nižší. U termočlánku T_7 byl rozdíl kolem 25 %. Opět nejhorší termočlánky byly T_3 a T_4 , které měřily teplotu až o 75 % nižší než T_2 .

Při vyhodnocování výsledků z měření je nutné brát v úvahu nejenom samotnou hodnotu odchylky vůči referenční teplotě (T_2 teplota vzorku v hloubce 2 mm od horního povrchu – obr. 2.40), ale i použité lepidlo, způsob zabudování, tvar a rozměry použitého termočlánku. Následkem nevhodně zvoleného lepidla může být odlepení termočlánku při vyšších teplotách vlivem nedostatečných teplotních limitů nebo různé tepelné roztažnosti oproti měřenému materiálu. Z uvedených grafů (obr. 2.45, obr. 2.47, obr. 2.46 a obr. 2.48) je patrný vliv proudění vzduchu kolem vzorku, který při nevhodném zabudování termočlánku zvýší hodnotu odchylky, což je nejvíce patrné u termočlánků T_3 a T_4 , které jsou na kolmo zabudované do měřeného povrchu a jejich kovový plášť velkého průměru (1 mm a 1,5 mm) funguje jako chladič. Naopak nejlepších výsledků

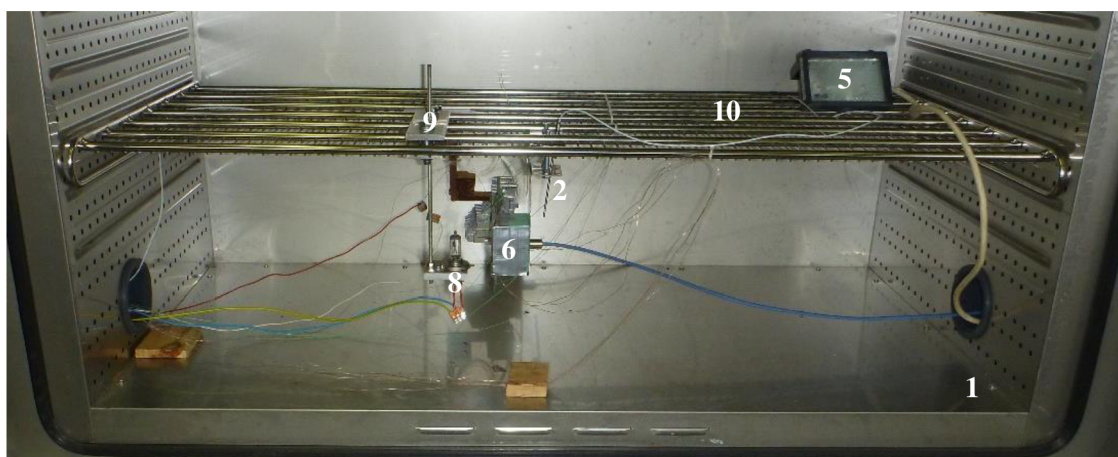
dosahuje termočlánek T_2 , vůči kterému jsou porovnávány teploty ostatních termočláneků. Dobrých výsledků dosahují termočláanky T_1 , T_6 a T_9 , které fungují spolehlivě v celém rozsahu měřených teplot. U termočláanky T_8 byl problém s lepicí vrstvou a došlo k odlepení během teploty $T_T = 100^\circ\text{C}$. Při druhém měření musel být přilepen znovu pomocí Loctite 424 vteřinového lepidla. Zároveň jeho velké rozměry jsou omezením při měření ve stísněných prostorech. Podobný problém byl i u T_{10} , u kterého vteřinové lepidlo nevydrželo a odlepilo se při $T_T = 160^\circ\text{C}$. Pro druhé měření byl termočlánek znovu přilepen silikonovou pastou. Termočlánek T_5 nevykazuje špatné hodnoty odchylky od referenční teploty, což nebylo dáno malým vnějším průměrem 0,5 mm. Ovšem způsob zabudování do vzorku není pro plášťový typ termočláneků nejvhodnější. Termočlánek T_7 je přilepen přímo na povrch měřeného vzorku pomocí sekundového lepidla Loctite 424, což není vhodné řešení a během měření vyšších teplot může snadno dojít k jeho odlepení.

Nejvhodnější jsou drátové termočláanky s malým průměrem drátu, jako například termočlánek s teflonovou izolací a průměrem drátu 0,25 mm (T_2 , T_6 , T_9 , T_{10}), který má velmi malý měřený spoj. Dále mají velmi tenké měřicí dráty, které jsou tepelně izolované. Proto je zabráněno odvodu tepla z měřeného místa. Díky absenci kovového pláště, není nutné mít termočlánek uložen v izotermě.

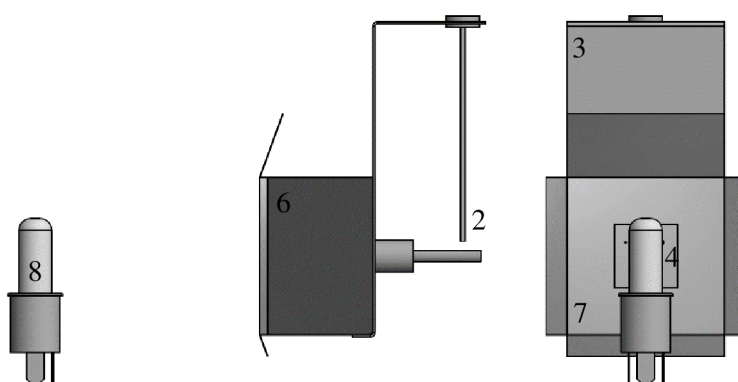
Studie vlivu světelného zdroje na měření teploty

Pro potřeby společnosti Škoda Auto a.s. byla v rámci dizertační práce provedena studie, jejímž cílem bylo prokázat vliv světelných zdrojů s velkou radiální složkou (halogenová žárovka H12) oproti “studeným” světelným zdrojům (LED) na měření teploty, kdy v kombinaci s nízkou emisivitou povrchu měřeného plastového materiálu (pokovený povrch) a termočláanky zabudovaným z ozařované strany dojde k velké odchylce měřených teplot. Typickým příkladem je měření teplot reflektoru světlometu v blízkosti žárovky. Pro testy byly použity dva druhy vzorků, které se běžně vyskytují ve světlometu. Plastový vzorek s pokoveným povrchem (parabola světlometu) a černý plast (tělo světlometu) bez jakýchkoliv úprav. Do vzorku bylo zabudováno celkem sedm termočláneků. Tři z přední strany, tři ze zadní strany. U zabudovaných termočláneků byl rovněž řešen vliv množství epoxidu použitého pro zalepení termočláanky v měřicím místě a jeho rozdílná emisivita oproti originálnímu povrchu.

Všechny experimenty probíhaly v termostatické komoře 1 (Binder MK 720), která zaručovala stálost podmínek během experimentů. Teplota okolí (T_{ok}) byla monitorována pomocí odporového teploměru PT100 2, který byl umístěn do držáku 3 vzorku 4. Komora 1 byla vyhřívána na požadovanou teplotu a ponechána 1 hodinu na teplotě z důvodu vytemperování. Během samotného měření již byla vypnutá, aby nedocházelo k ochlazování vzorku 4 vlivem nucené konvekce. Udržování okolní teploty bylo prováděno ručně ohřevem pomocí topného tělesa 5 vloženého do komory 1. Vzorek 4 byl osazený termočláanky a vsazen do izolace 6, která byla na přední straně potažená hliníkovou fólií 7 pro snížení absorpce tepelné energie. Světelný zdroj 8 (Halogenová žárovka H12 a LED) byl pomocí držáku 9 přichycen k roštu 10 komory a před něj byl umístěn měřený vzorek 4. Byly měřeny dva vzorky 4 s pokoveným povrchem a černým, které byly ozařovány dvěma různými světelnými zdroji 8 (LED a H12) Zároveň byla měněna vzdálenost vzorku a světelného zdroje a teploty okolí (25°C a 50°C). Každá konfigurace byla proměřena alespoň třikrát, aby bylo zabráněno chybě během měření a zároveň byla zjištěna opakovatelnost naměřených dat.



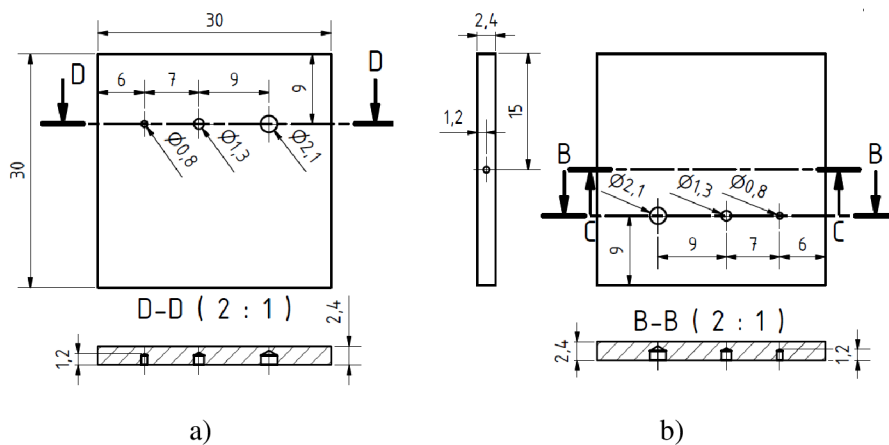
a)



b)

Obr. 2.49 Měřicí obvod (a – Sestava v termostatické komoře, b – 3D model s bočním a předním pohledem, 1 termostatická komora, 2 teploměr, 3 držák vzorku, 4 vzorek, 5 topné těleso, 6 izolace, 7 hliníková fólie, 8 světelná zdroj, 9 držák světelného zdroje)

Z těla světlometu byl vyříznut černý vzorek a z reflektoru pokovený vzorek o rozměrech 30 mm na 30 mm. Do těchto materiálů byly vyvrtány díry o různých průměrech. Tři z přední strany, tři ze zadní strany. Díry byly vrtány, tak aby měřicí spoj termočlánků byl ve stejné hloubce vzorku, jak z přední, tak ze zadní strany.

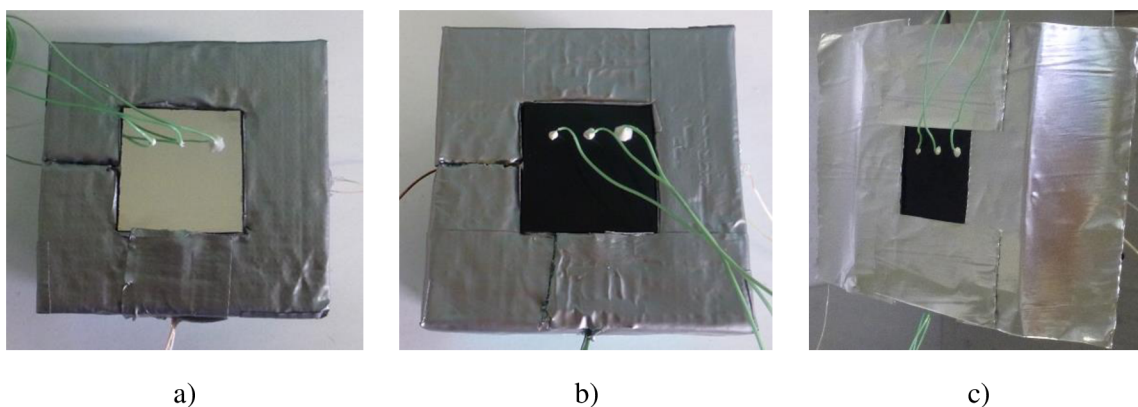


a)

b)

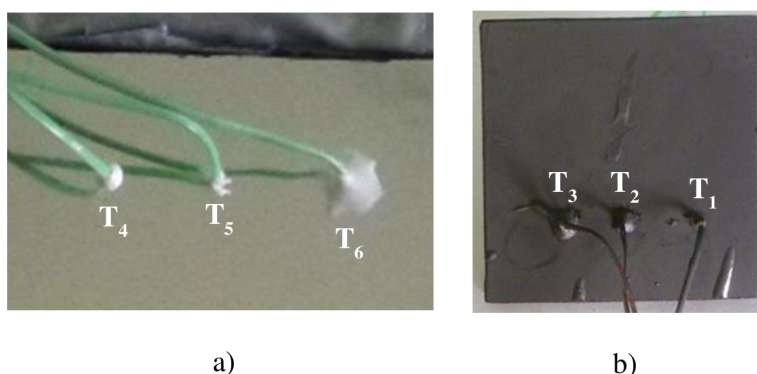
Obr. 2.50 Konstrukce vzorku (a – Přední strana, b – Zadní strana)

Vzorek osazený termočlánky byl následně vsazen do polystyrénové izolace a přední plocha byla přelepena hliníkovou fólií pro snížení tepelného toku přijímaného polystyrénem ze světelného zdroje.



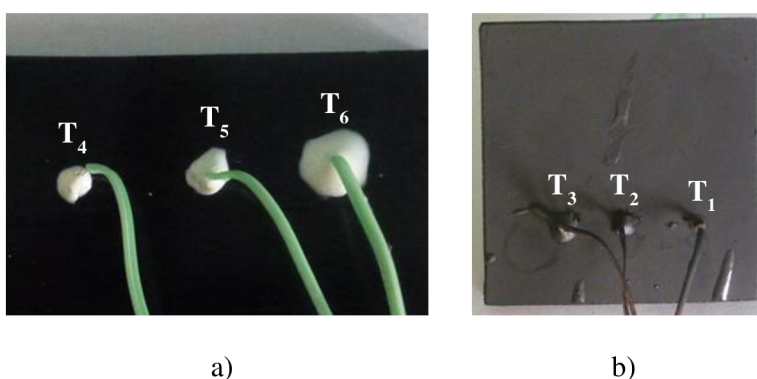
Obr. 2.51 Zabudovaný vzorek do izolace (a – Pokovený vzorek, b – Černý vzorek, c – Přelepená hliníková folie)

Při vlepování termočlánků byl kladen důraz na množství lepidla kolem termočlánku. U T_6 bylo lepidlo úmyslně rozetřeno do větší vzdálenosti, aby byl prezentován efekt rozdílné emisivity lepidla a povrchu vzorku na měřené teploty.



Obr. 2.52 Pokovený vzorek (a – Detail termočlánků přední strany, b – Zadní strana)

Stejným způsobem byly termočlánky vlepány i do černého vzorku.

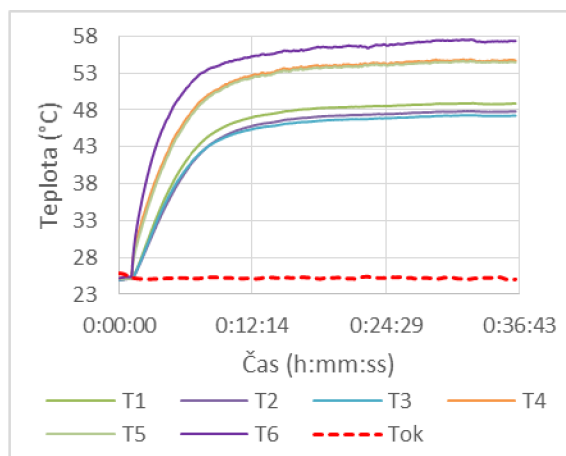
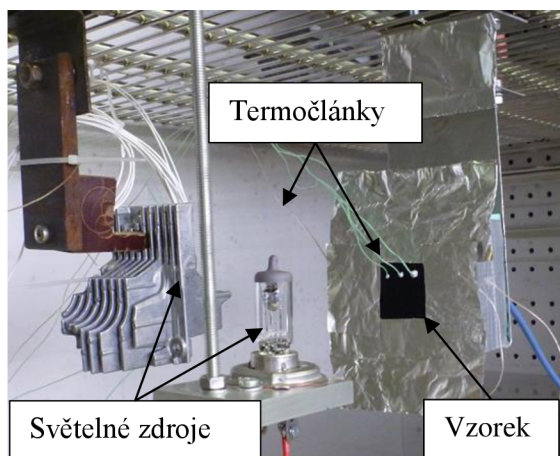


Obr. 2.53 Černý vzorek (a – Detail termočlánků přední strany, b – Zadní strana)

Z obou stran byly díry vrtány do hloubky 1,2 mm, aby bylo možno měřit teplotu uprostřed tloušťky vzorku. Do každé díry byl vložen stejný drátový termočlánek typu – K s teflonovou izolací a průměrem drátu $d = 0,127$ mm (označení 5TC-TT-K-36-72). Popis a označení jednotlivých termočláneků je uveden v tab. 2.9. Díra s vloženým termočlánekem byla vyplněna lepidlem Loctite EA 9492, což je vysokoteplotně odolný dvousložkový epoxid s maximální teplotou do 180 °C. Lepidlo a měřený materiál má stejnou tepelnou vodivost $0,3 \text{ W m}^{-1}\text{K}^{-1}$.

Tab. 2.9 Termočláanky vzorku

| Ø díry (mm) | Termočláanky zadní strany | Termočláanky přední strany |
|-------------|------------------------------|-------------------------------|
| 0,8 | T ₁ | T ₄ |
| 1,3 | T ₂ | T ₅ |
| 2,1 | T ₃ | T ₆ |



a)

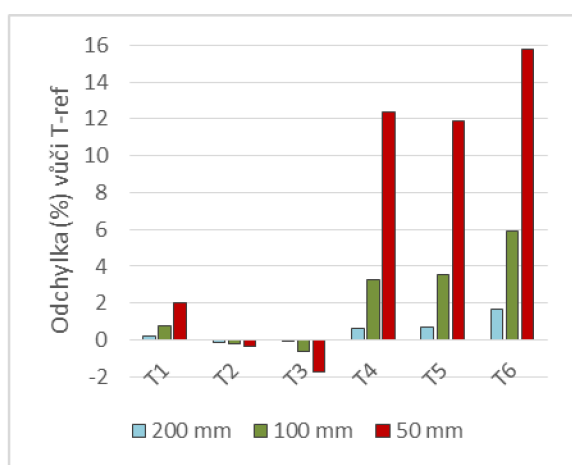
b)

Obr. 2.54 Vliv světelného zdroje v termostatické komoře (a – Experiment, b – Výsledky)

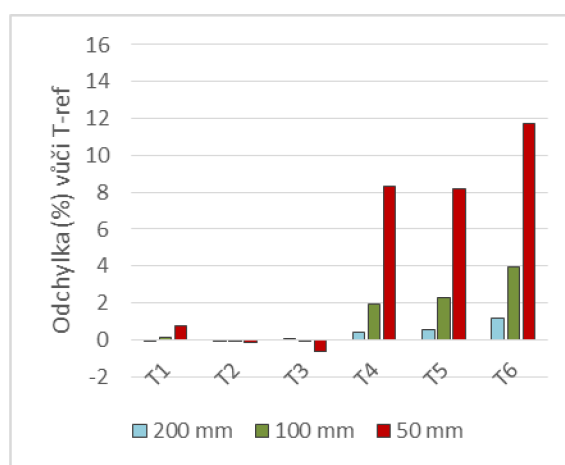
Naměřené hodnoty teplot pro jednotlivé termočláanky z ustálené části experimentu jsou číselně zobrazeny v tabulkách a porovnány pomocí procentuální odchylky od referenční teploty (T-ref), která byla stanovena zprůměrováním teplot ze zadní strany vzorku T₁, T₂ a T₃ pro minimálně 3 experimenty stejné konfigurace. Kladná hodnota odchylky je pro teplotu, která je vyšší, než teplota T-ref. Záporná hodnota odchylky je pro teplotu nižší, než je teplota T-ref.

Tab. 2.10 Teploty (°C) z ustáleného stavu pro pokovený vzorek ozařovaný žárovkou H12

| T _{ok} | Vzdálenost (mm) | T-ref | T ₁ zadní d0,8 mm | T ₂ zadní d1,3 mm | T ₃ zadní d2,1 mm | T ₄ přední d0,8 mm | T ₅ přední d1,3 mm | T ₆ přední d2,1 mm |
|-----------------|-----------------|-------|------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|
| 25 | 200 | 28,4 | 28,4 | 28,4 | 28,4 | 28,6 | 28,6 | 28,9 |
| | 100 | 32,8 | 33,1 | 32,8 | 32,7 | 33,9 | 34,1 | 34,9 |
| | 50 | 47,4 | 48,4 | 47,2 | 46,6 | 54,1 | 53,8 | 56,3 |
| 50 | 200 | 53,7 | 53,7 | 53,7 | 53,7 | 53,9 | 54,0 | 54,3 |
| | 100 | 59,3 | 59,3 | 59,2 | 59,2 | 60,4 | 60,7 | 61,7 |
| | 50 | 73,6 | 74,2 | 73,5 | 73,1 | 80,3 | 80,2 | 83,4 |



a)



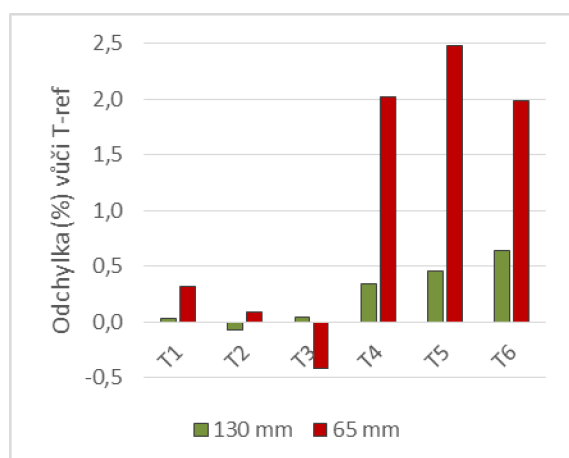
b)

Obr. 2.55 Pokovený vzorek ozařovaný žárovkou H12, teplota okolí (a – 25 °C, b – 50 °C)

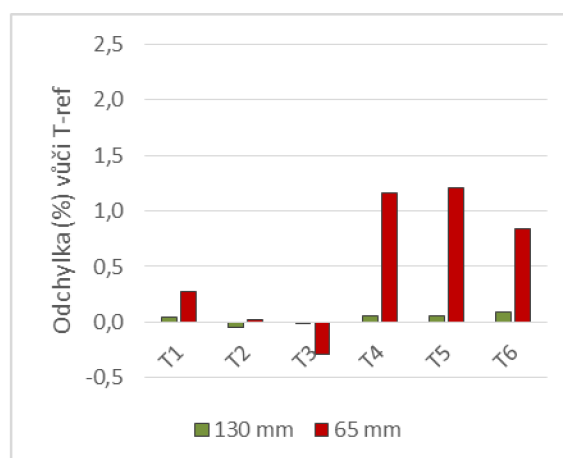
Vzdálenost od světelného zdroje má silný účinek na zvýšení měřených teplot vlivem zabudování termočlánků do vzorku. Pro větší vzdálenosti bylo množství dopadajícího záření malé, proto nebyl velký rozdíl mezi termočládky zabudovanými do přední a zadní strany. Pro vzdálenost 100 mm, již docházelo k odchylkám a pro 50 mm byly rozdíly pro termočládky T₄ a T₅ na 12 % (T_{ok} 25 °C) a 8 % (T_{ok} 50 °C). Vliv rozdílné emisivity povrchu vzorku a použitého lepidla byl nejvíce patrný u termočládku T₆, kde byla měřená teplota o 16 % vyšší (T_{ok} 25 °C) a 12 % (T_{ok} 50 °C), než T-ref.

Tab. 2.11 Teploty (°C) z ustáleného stavu pro pokovený vzorek ozařovaný LED

| T _{ok} | Vzdálenost (mm) | T-ref | T ₁ zadní d0,8 mm | T ₂ zadní d1,3 mm | T ₃ zadní d2,1 mm | T ₄ přední d0,8 mm | T ₅ přední d1,3 mm | T ₆ přední d2,1 mm |
|-----------------|-----------------|-------|------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|
| 25 | 130 | 27,0 | 27,0 | 27,0 | 27,0 | 27,1 | 27,1 | 27,2 |
| | 65 | 31,6 | 31,7 | 31,6 | 31,4 | 32,2 | 32,4 | 32,2 |
| 50 | 130 | 52,5 | 52,5 | 52,5 | 52,5 | 52,5 | 52,5 | 52,5 |
| | 65 | 56,1 | 56,3 | 56,1 | 56,0 | 56,8 | 56,8 | 56,6 |



a)



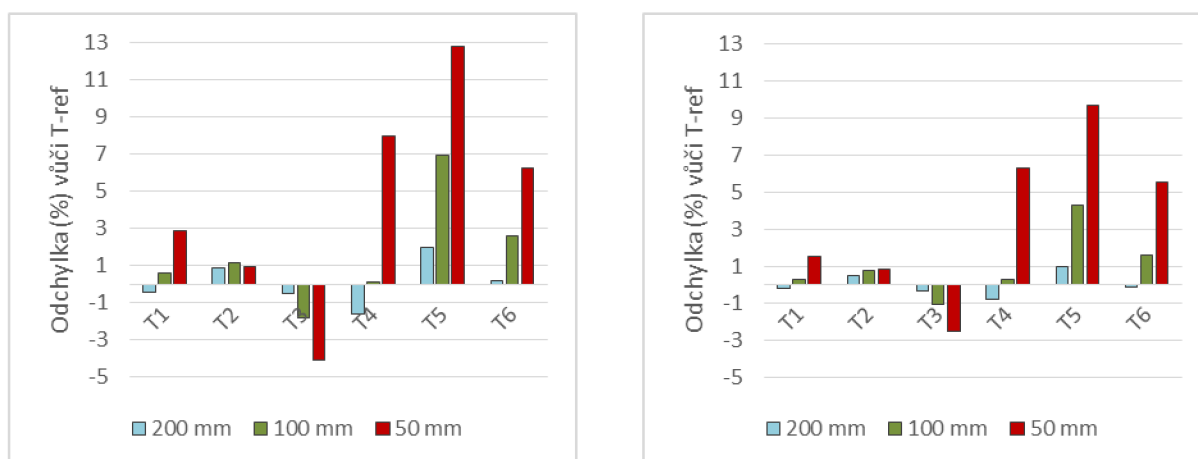
b)

Obr. 2.56 Pokovený vzorek ozařovaný LED, teplota okolí (a – 25 °C, b – 50 °C)

Pro konfiguraci pokoveného vzorku a LED světelného zdroje byly proměřeny pouze dvě vzdálenosti z důvodu nízkého, až neměřitelného nárůstu teplot vzorku, který byl v řádu desetin stupně. Při použití studeného zdroje světla nemá způsob zabudování termočlánků (přední/ zadní strana vzorku) výrazný vliv na měřené teploty.

Tab. 2.12 Teploty (°C) z ustáleného stavu pro černý vzorek ozařovaný žárovkou H12

| T _{ok} | Vzdálenost (mm) | T-ref | T ₁ zadní d0,8 mm | T ₂ zadní d1,3 mm | T ₃ zadní d2,1 mm | T ₄ přední d0,8 mm | T ₅ přední d1,3 mm | T ₆ přední d2,1 mm |
|-----------------|-----------------|-------|------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|
| | 200 | 37,1 | 37,0 | 37,5 | 36,9 | 36,5 | 37,9 | 37,2 |
| 25 | 100 | 58,1 | 58,4 | 58,7 | 57,0 | 58,2 | 62,4 | 59,6 |
| | 50 | 117,4 | 120,9 | 118,6 | 112,8 | 127,7 | 134,7 | 125,3 |
| | 200 | 61,3 | 61,2 | 61,6 | 61,1 | 60,9 | 61,9 | 61,3 |
| 50 | 100 | 81,3 | 81,5 | 81,9 | 80,4 | 81,5 | 85,0 | 82,6 |
| | 50 | 138,2 | 140,4 | 139,4 | 134,8 | 147,5 | 153,1 | 146,3 |



a)

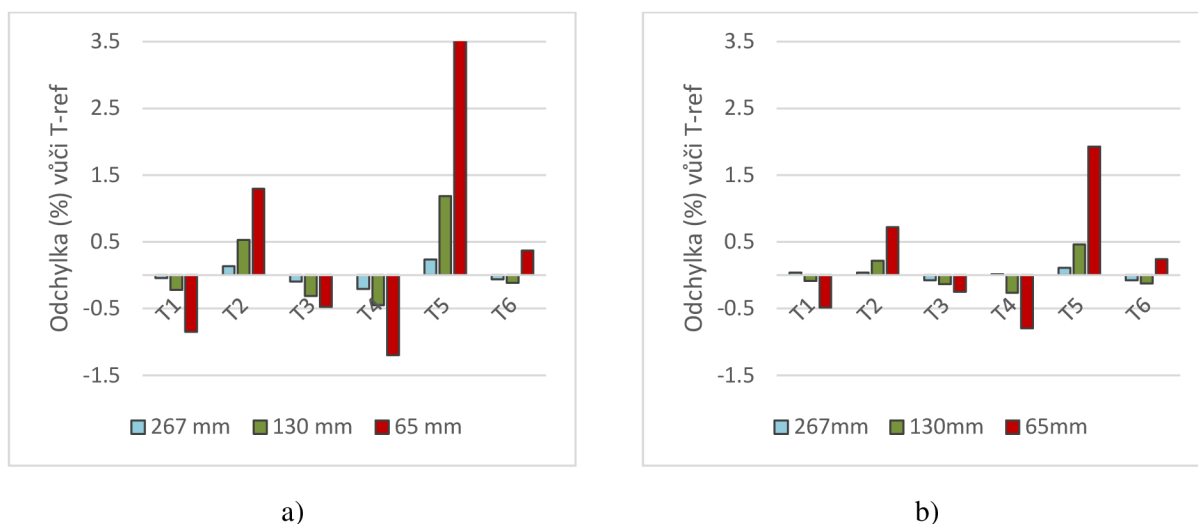
b)

Obr. 2.57 Černý vzorek ozařovaný žárovkou H12, teplota okolí (a – $25\text{ }^\circ\text{C}$, b – $50\text{ }^\circ\text{C}$)

I u černého vzorku byl patrný stejný trend, jako u pokoveného vzorku. Se snižující se vzdáleností mezi vzorkem a zdrojem světla (H12) docházelo ke zvyšujícímu rozdílu mezi teplotami přední a zadní strany. Ovšem u černého vzorku byly rozdíly odchylky nižší z důvodu vyšší emisivity povrchu vzorku. Pro nejbližší vzdálenost 50 mm byla měřená teplota na T_4 a T_6 o (5,5 až 7,5) % vyšší, než T_{ref} . U termočlánu T_5 byla měřená teplota o 13 % ($T_{ok}\ 25\text{ }^\circ\text{C}$) a 10 % ($T_{ok}\ 50\text{ }^\circ\text{C}$) vyšší, než T_{ref} . Ze způsobu zabudování termočlánu do vzorku – viz obr. 2.53 by nejvyšších hodnot odchylek měl dosahovat T_6 . Ovšem z naměřených teplot pro černý vzorek tomu, tak nebylo. Při lepení termočlánu T_5 zůstala v otvoru malá vzduchová bublinka v blízkosti měřicího spoje, která byla odhalena, až po následné demontáži termočlánu ze vzorku, proto vykazuje nejvyšší hodnotu odchylky.

Tab. 2.13 Teploty ($^\circ\text{C}$) z ustáleného stavu pro černý vzorek ozařovaný LED

| T_{ok} | Vzdálenost (mm) | T_{ref} | T_1 zadní d0,8 mm | T_2 zadní d1,3 mm | T_3 zadní d2,1 mm | T_4 přední d0,8 mm | T_5 přední d1,3 mm | T_6 přední d2,1 mm |
|----------|-----------------|-----------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|
| 25 | 200 | 27,5 | 28 | 28 | 28 | 27 | 28 | 28 |
| | 100 | 30,8 | 30,7 | 30,9 | 30,7 | 30,6 | 31,1 | 30,7 |
| | 50 | 42,0 | 41,6 | 42,5 | 41,8 | 41,5 | 43,5 | 42,1 |
| 50 | 200 | 52,1 | 52,1 | 52,1 | 52,1 | 52,1 | 52,2 | 52,1 |
| | 100 | 56,2 | 56,1 | 56,3 | 56,1 | 56,0 | 56,4 | 56,1 |
| | 50 | 65,8 | 65,5 | 66,3 | 65,6 | 65,3 | 67,1 | 65,9 |



Obr. 2.58 Černý vzorek ozařovaný LED, teplota okolí (a – 25 °C, b – 50 °C)

Stejně jako u pokoveného vzorku ani u černého vzorku neměl způsob zabudování termočlánků vliv na měřené teploty. Pouze u termočlánku T₅ je měřená teplota vyšší, což bylo způsobeno chybným zalepením termočlánku, jak bylo uvedeno výše.

Z provedených experimentů vyplývá, že nejnáchylnější případ na zabudování termočlánků byl povrch s nízkou emisivitou (pokovený vzorek) ozařovaný halogenovou žárovkou, která vyzařuje velké množství energie radiací. Odchylka v měřených teplotách byla pro nejbližší vzdálenost mezi vzorkem a žárovkou, až o 16 % vyšší (T₆) pro T_{ok} = 25 °C. Ve světlometech jsou to měření reflektorů v blízkosti světelných zdrojů s vysokým radiačním výkonem (halogenové žárovky). Rovněž při měření černého vzorku byl rozdíl v měřených teplotách mezi přední (T₄, T₅, T₆) a zadní (T₁, T₂, T₃) stranou vzorku. Ovšem teploty byly kolem 7 % vyšší, než referenční teplota. Rovněž vliv vzdálenosti hraje svou roli. Pro vzdálenost 200 mm byl rozdíl velice malý. Výraznější odchylek se začalo dosahovat, až od 100 mm. Záleží samozřejmě na výkonu světelného zdroje. Při použití výkonnějšího zdroje bude vyšší i radiační tok, který by ovlivnil měřenou teplotu do větší vzdálenosti. Zvolené světelné zdroje byly typické pro aplikace automobilových světlometů. Obecně lze říci, že tento jev je dán kombinací použitého světelného zdroje (halogenové žárovky), který má vysoký radiační výkon. Ten sebou nese nejvíce energie, a tudíž nejvíce ohřívá povrch osvětleného předmětu. Dále vysokou emisivitou lepidla na termočlánky, které je schopno pohltit větší množství energie a v kombinaci s nízkou tepelnou vodivostí okolních plastů (0,3 W m⁻¹K⁻¹) se takto vzniklé teplo kumuluje v okolí termočlánku, kde může dojít v extrémních případech k natažení nebo i roztavení měřeného materiálu. Proto je vždy výhodnější zabudovávat termočlánky z neosvětlené strany a předejít komplikacím při měření.

2.8. Stanovení emisivity lesklých povrchů

Při nestacionárním způsobu stanovení emisivity lesklého povrchu byl vzorek o neznámé emisivitě ozařován zdrojem tepelného záření. Ze zadní strany bylo zalepeno teplotní čidlo a měřený materiál byl z neozařovaných stran tepelně izolován. V prvním měření byl na teplotním čidle vzorku s originálním (neznámým) povrchem zaznamenán nárůst teploty v čase. Před druhým měřením byl ozařovaný povrch opatřen vrstvou o známé emisivitě a měření bylo zopakováno ve shodné konfiguraci a se shodnými počátečními teplotami. Na teplotním čidle byl opět zaznamenán nárůst teploty v čase. Následně byl vytvořen výpočtový model odpovídající konfiguraci měření. Dále byla z druhého měření zjištěna hodnota teploty radiálního zdroje a následně byla provedena optimalizace s cílem shody teplot mezi naměřenými hodnotami a výpočtovým modelem. Poté byl již odladěný výpočtový model aplikován na první měření a jako jediná neznámá zůstala emisivita originálního povrchu. V takto připraveném modelu byla hodnota emisivity optimalizována, dokud nebyl rozdíl mezi naměřenými a vypočtenými daty minimální, přičemž okrajové a počáteční podmínky byly použity teploty získané z měření. [38]

Metodika stanovení emisivity byla vyvinuta autorem dizertační práce a je patentově chráněná úřadem pro průmyslové vlastnictví pod názvem Způsob měření emisivity lesklých povrchů a jeho kopie je umístěna v příloze práce. Číslo přihlášky je 2014-835 a číslo dokumentu je 305705.

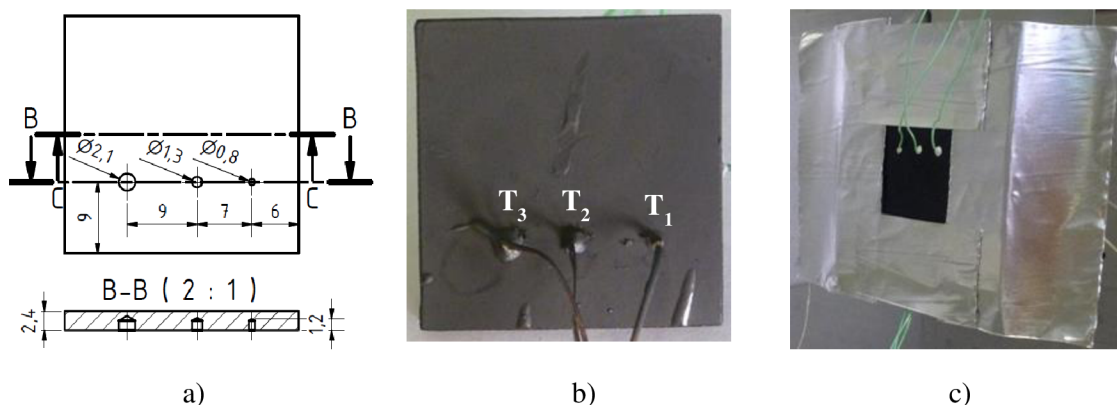
Měření

Pro potřeby stanovení emisivity bylo sestaveno experimentální měření, které bylo totožné s předchozí podkapitolou Studie vlivu světelného zdroje. Ovšem zde byly použity pouze teploty ze zadních termočlánků (T_1 až T_3) a na základě jejich hodnot byla dopočítána emisivita povrchu vzorku. Schéma měření – viz obr. 2.49. Měření bylo složeno ze světelného zdroje 8 s homogenním rozložením intenzity osvětlení a dále z měřeného vzorku 4 vsazeného do polystyrenové izolace 3. Všechny měření probíhaly v termostatické komoře 1 Binder MK 720, která zaručila stálost okolních podmínek během celého experimentu. Na komoře 1 byla nastavena požadovaná teplota a po dobu 1 hodiny byla ponechána zapnutá, čímž došlo k vytemperování vnitřního prostoru. Jelikož komora udržuje teplotu nucenou konvekcí, bylo nutné ji během samotných experimentů vypínat, aby nenarušovala proudění vzduchu kolem vzorku 4. Teplota uvnitř byla udržována pomocí externího zdroje tepla 5. Tím se eliminovala teplotní regulace komory, která by zkreslila proudění kolem vzorku. V numerických simulacích by bylo velmi obtížné definovat takto proměnnou okrajovou podmínku, což by mělo negativní vliv na přesnost dosažených výsledků. Byly zvoleny dvě úrovně teploty okolí 25 °C a 50 °C a dvě vzdálenosti mezi světelným zdrojem a vzorkem 200 mm a 100 mm. Z důvodu eliminace chyb vzniklých stanovením emisivity pouze pro jednu pozici a hlavně ověřením robustnosti metody byly zvoleny čtyři konfigurace, v kterých je zahrnut vliv teploty okolí a vzdálenosti od tepelného zdroje. Pro každou konfiguraci byla provedena dvě měření. V prvním byl změřen vzorek s neznámou emisivitou (pokovený povrch) a před druhým měřením byl na povrch nanesen grafit o emisivitě $\varepsilon = 0,97$ (-). Z obou měření byly zaznamenány teploty v čase, které byly použity pro nastavení numerických simulací, jak bylo popsáno na začátku kapitoly.

Vzorek 4 s termočlánky byl vsazen do polystyrenové izolace 6 a umístěn naproti radiálnímu zdroji, kterým byla žárovka 8. Vzorek 4 a žárovka 8 byly vůči sobě pozicovány pomocí držáků 4, které byly pevně spojeny s roštem 10 termostatické komory 1 pro zaručení shodné pozice během všech experimentů. Na přední plochu

izolace 6 byla nalepena hliníková fólie 7, která omezovala absorpci tepelné energie emitované žárovkou 8. Dále byl ze zadní strany vyhlouben otvor, který sloužil jako průzor pro kontrolní měření teploty vzorku pomocí pyrometru 11. Z důvodu přesného měření teploty okolí – T_{ok} (uvnitř komory) byla sestava měření opatřena odporovým teploměrem 2. Měření bylo ukončeno po ustálení teplot na vzorku 4. Celý postup byl zopakován pro všechny zvolené konfigurace měření.

Vzorek s pokoveným povrchem o rozměrech 30 mm x 30 mm byl vyříznut z reflektoru světlometu a následně do něj byly vyvrtány pro termočlánky tři díry z přední, tři díry ze zadní strany a jedna z boku. Všechny díry byly vrtány, tak aby byla měřena teplota uprostřed tloušťky vzorku. Pro vyhodnocení emisivity byly použity pouze tři termočlánky ze zadní strany vzorku (T_1 , T_2 a T_3). Ty nebyly ovlivněny dopadajícím zářením ze žárovky. Zároveň byl díky měření ve více místech zadní strany omezen případný efekt lokálního zvýšení teploty vlivem možné nehomogenity dopadajícího záření. Pro vyhodnocování pomocí numerických simulací byla použita průměrná teplota ze všech tří termočlánků zadní strany.



Obr. 2.59 Vzorek (a – Výkres s T_1 až T_3 , b – Zadní strana vzorku s T_1 až T_3 , c – Zabudovaný vzorek do izolace)

Sestavený měřicí obvod byl realizován pomocí techniky od americké firmy National Instruments (NI), která byla propojena s notebookem pro zobrazení a záznam teplot. Z důvodu nutnosti zapojení více modulů bylo použito osmi modulové šasi pro měření teplot termočládkovým modulem NI 9214-TB (teploty vzorku) a modulem NI 9217 pro použití odporových teploměrů PT100 (teplota okolí), dále pro kontrolu byla zaznamenávána teplota zadní strany vzorku pomocí pyrometru Amír 7843.

LabVIEW je grafické vývojové prostředí pro návrh měřicích systémů od americké společnosti National Instruments. Umožňuje sestavení měřicího obvodu dle potřeb daného měření pomocí zapojení měřicích modulů. Šasi je propojeno přes USB s notebookem a slouží k ovládání zapojených modulů. Následně je zapotřebí naprogramovat v LabVIEW program, který umožní ovládání, zobrazení a zaznamenání měřených hodnot. Jádrem je tzv. blokové schéma, které umožňuje naprogramovat funkcionalitu ovládacího programu dle požadavků. Zobrazení ovládacích prvků programu (např.: start, stop, frekvence záznamu dat, ukládání souboru s naměřenými daty, atd.) a aktuální hodnoty měřených veličin jsou v uživatelském rozhraní.

Numerický model

K zjištění hodnoty emisivity pro lesklý (pokovený) vzorek bylo nutné na základě měření naladit zjednodušený numerický model. Pro tyto účely byl použit software od společnosti ANSYS a to konkrétně Transient thermal. Do modelu, který se skládal pouze ze solid domény (vzorku a izolace) byly zadány okrajové podmínky, které byly naměřeny během experimentu a termofyzikální vlastnosti použitých materiálů. Proudění vzduchu nebylo modelováno, proto bylo nutné jeho vliv nahradit pomocí vypočtené hodnoty součinitele přestupu tepla, který byl spočítán na základě naměřených teplot pro každý experiment. Model se skládá ze vzorku o rozměrech 30mm x 30mm vsazeného do izolace a žárovky, kterou reprezentuje těleso umístěné paralelně s ozařovaným povrchem vzorku. Pro stanovení emisivity bylo nejdůležitější teplotně neustálená část z měření, proto byl zvolen nestacionární typ výpočtu s přímým řešičem a proměnnou délkou časového kroku. Celý simulovaný čas trval 600 sekund a byl rozdělen na šest úseků, kterými byl zajištěn časově jemnější výpočet pro okamžiky prudké změny teploty na začátku simulace. Na konci již byly teploty ustálené, proto bylo možno zvolit velký časový krok – viz následující tabulka. S tímto nastavením měl výpočet přes 60 časových kroků.

Tab. 2.14 Popis časových kroků transientního výpočtu teplot (s)

| Konec jednotlivých kroků | Délka časového kroku | | |
|--------------------------|----------------------|-----------|-----------|
| | Počáteční | Minimální | Maximální |
| 10 | 1 | 0,1 | 5 |
| 10,5 | 0,05 | 0,01 | 0,1 |
| 30 | 0,3 | 0,1 | 1 |
| 60 | 3 | 1 | 5 |
| 200 | 10 | 5 | 20 |
| 600 | 10 | 5 | 50 |

Pro každý experiment byly nastaveny okrajové podmínky přesně podle naměřených hodnot. Počáteční teplota byla určena podle teploty vzorku na začátku měření. Teplota okolí je průměrná teplota během celého experimentu. Součinitel přestupu tepla byl vypočítán na základě ustálených teplot vzorku a polystyrénu.

Tab. 2.15 Použité okrajové podmínky

| Plocha okrajové podmínky | Okrajová podmínka |
|--------------------------|--|
| Vzorek přední plocha | radiace (z povrchu na povrch) a konvekce |
| Izolace přední plocha | radiace (z povrchu na povrch) a konvekce |
| Izolace zadní plocha | izolována |
| Izolace zbytek ploch | radiace (do okolí) a konvekce |
| Žárovka přední plocha | radiace (z povrchu na povrch) a teplota |
| Žárovka zbytek ploch | izolovány |

Tepelná energie ze zdroje byla emitována povrchem a pomocí radiačního modelu Surface-to-Surface (S2S) transportována na přední plochu vzorku a izolace. Odtud byla vedením distribuována dál do jednotlivých materiálů za pomoci termofyzikálních vlastností. Na rozhraní vzorku a izolace byl kontaktní odpor, který zpomaluje přechod tepla mezi oběma tělesy. Na vnějších površích byl zadán součinitel přestupu tepla, který byl stanoven na základě provedených měření a z nich dosažených teplot v ustáleném stavu, čímž byl nahrazen vliv okolního proudění vzduchu přirozenou konvekcí (viz kapitola 1.4 Druhy přenosu tepla) a jeho odvod tepla do okolí.

Surface-to-Surface (S2) je zjednodušený radiační model, který předpokládá, že hodnota emisivity a absorpce je stejná. Využívá tzv. Gray-Diffuse Radiation, které je nezávislý na vlnové délce. Energie vyměněná mezi dvěma povrchy je závislá na jejich velikosti, vzdálenosti a orientaci. Tyto parametry jsou nazývány view factor. Energetický tok opouštějící daný povrch je skložen přímo z vyzařované a odražené energie. Odražený energetický tok je závislý na dopadajícím energetickém toku z okolí.

$$\text{Energie opouštějící povrch z} \quad q_{out,z} = \varepsilon_z \sigma T_z^4 + \rho_z q_{in,z}, \quad (2.4)$$

kde $q_{out,z}$ je energetický tok opouštějící povrch, ε_z je emisivita, σ je Stefan-Boltzmannova konstanta a $q_{in,z}$ to je energetický tok, který na povrch dopadne z okolí.

Efekt odebraného tepla přirozenou konvekcí na vertikální stěně lze popsat pomocí kritériálních rovnic obsahující bezrozměrná (podobnostní) čísla a na jejich základě vypočítaným součinitelem přestupu tepla.

$$\text{Rayleighovo číslo} \quad Ra = Gr \cdot Pr = \frac{g\gamma(T_s - T_{ok})L^3}{\nu a}, \quad (2.5)$$

kde Gr je Grashofovo číslo, Pr je Prandtlovo číslo, g je gravitační zrychlení, γ je teplotní součinitel objemové roztažnosti, T_s je teplota chlazeného povrchu, T_{ok} je teplota okolí, L je charakteristický rozměr (výška stěny), ν je kinematická viskozita, a je součinitel teplotní vodivosti.

Pro výpočet Nusseltova čísla je nutné znát hodnotu Rayleighova čísla. Vzorec (2.6) platí pro rozmezí $10^9 \leq Ra \leq 10^{13}$ a vzorec (2.7) platí pro $Ra \leq 10^9$. U měřených experimentů bylo Rayleighovo číslo kolem 327 953 (-), proto pro výpočet součinitele přestupu tepla byl použit vzorec (2.7).

$$\text{Nusseltovo číslo} \quad Nu = \left\{ 0,825 + \frac{0,387Ra^{1/6}}{[1 + (0,492/Pr)^{9/16}]^{8/27}} \right\}^2 \quad (2.6)$$

$$Nu = 0,68 + \frac{0,67Ra^{1/4}}{[1 + (0,492/Pr)^{9/16}]^{4/9}}, \quad (2.7)$$

kde Ra je Rayleighovo číslo, Pr je Prandtlovo číslo.

Pro ohřátý vzorek byla hodnota součinitele přestupu tepla kolem $5 \text{ W m}^{-2}\text{K}^{-1}$.

$$\text{Součinitel přestupu tepla} \quad h = \frac{Nu \cdot \lambda}{L}, \quad (2.8)$$

kde Nu je Nusseltovo číslo, L je charakteristický rozměr (výška stěny), λ je součinitel tepelné vodivosti.

Pro správné naladění modelu bylo zapotřebí znát rovněž termofyzikální vlastnosti použitých materiálů. V modelu jsou uvažovány čtyři různé materiály. Vzorek z plastu PP T40, izolace polystyrén, dále Loctite EA 9492 vysokoteplotně odolný dvousložkový epoxid pro připevnění termočlánků. Posledním

materiálem byl grafit nastříknut na pokovený povrch vzorku během měření tepelného výkonu světelného zdroje. Grafitová vrstva byla nejprve v modelu zanedbána z důvodu velice malé tloušťky 0,01 mm. Díky vysoké tepelné vodivosti v porovnání s ostatními materiály, která je o dva řády vyšší funguje na povrchu jako tepelný most. U modelu bez grafitové vrstvy byla na povrchu uprostřed teplota vzorku, až o dva stupně vyšší, než u modelu s grafitem.

Tab. 2.16 Termofyzikální vlastnosti použitých materiálů

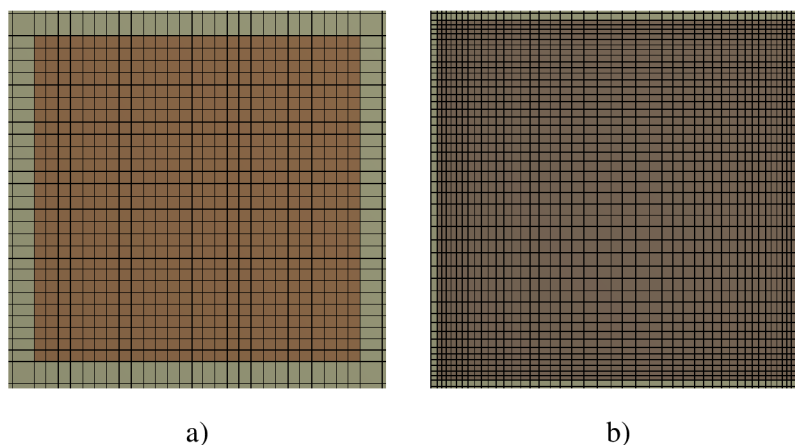
| Materiál | ρ (kg m ⁻³) | λ (W m ⁻¹ K ⁻¹) | c_p (J kg ⁻¹ K ⁻¹) |
|---------------|------------------------------|--|---|
| Vzorek PP T40 | 1212,35 | $\lambda = 0,0009T(^{\circ}\text{C}) + 0,1521$ | 1378,2 |
| Polystyrén | 56 | 0,025 | 1210 |
| Epoxid | 1350 | 0,3 | 800 |
| Grafit | 2250 | 600 | 28,36 |

Vrstva grafitového prášku byla ve skutečnosti okolo 0,01 mm, což nebylo možné při tvorbě výpočtové sítě do modelu zahrnout. Proto byla vrstva grafitu úmyslně zvětšena na 0,25 mm a následně se hodnoty součinitele tepelné vodivosti a měrné tepelné kapacity přepočítaly pro novou tloušťku.

Tab. 2.17 Grafit přepočet termofyzikálních vlastností pro tloušťku 0,25 mm

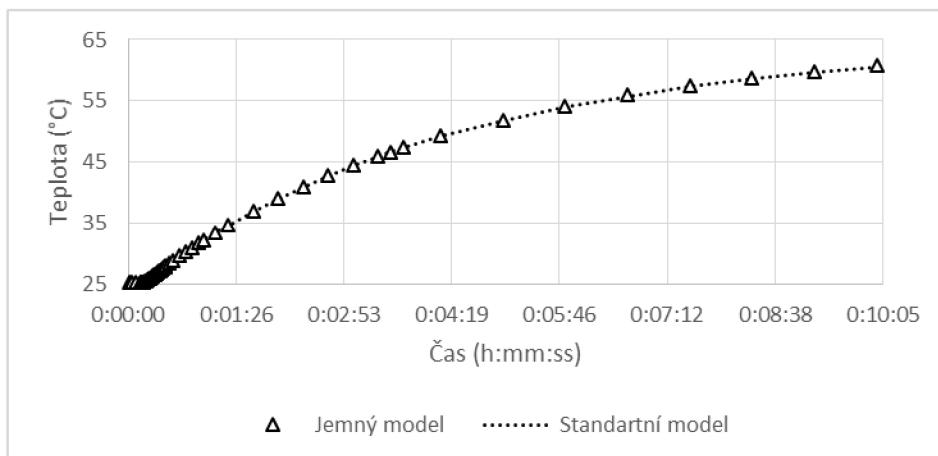
| Grafit | ρ (kg m ⁻³) | λ (W m ⁻¹ K ⁻¹) | c_p (J kg ⁻¹ K ⁻¹) |
|------------------|------------------------------|--|---|
| 0,01 mm | 2250 | 24 | 709 |
| 0,25 mm přepočet | 2250 | 600 | 28,36 |

V rámci simulací byla rovněž provedena citlivostní analýza s cílem ověřit, zda výsledky nejsou závislé na výpočetní síti. Použitá standardní síť s 50 813 elementy byla srovnána s jemnou sítí s 164 146 elementy. Výpočtový čas u standardní sítě byl 33 min. U jemné sítě bylo zapotřebí 6 h 47 min. Na následujícím obrázku jsou srovnány výpočetní sítě přední plochy vzorku.



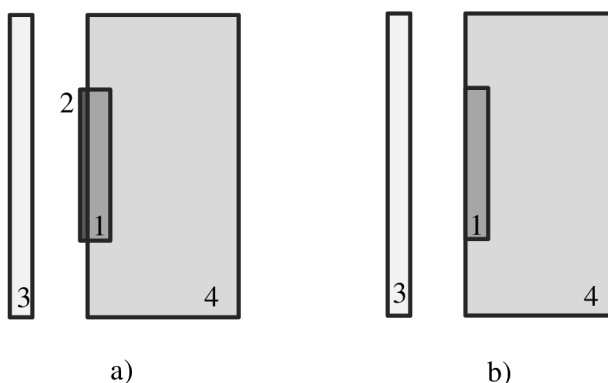
Obr. 2.60 Výpočetní síť vzorku (a – Standardní, b – Jemná)

Ze srovnání teplot v místě termočlánku z obou sítí je patrné, že hodnoty teplot jsou totožné – viz obr. 2.61. Při dosažení maximální teploty vzorku byla rovněž maximální odchylka mezi oběma modely, která činila 0,2 °C, což byl zanedbatelný rozdíl. Lze konstatovat, že standartní síť poskytuje dostatečnou přesnost. Zároveň bylo prokázáno, že další zjemňování výpočetní sítě není potřebné.



Obr. 2.61 Srovnání výsledků teplot z obou výpočetních sítí

Pro stanovení emisivity byly potřeba vždy dvě měření na každou konfiguraci, protože na začátku byly dva neznámé parametry teplota žárovky a emisivita vzorku. Bylo nezbytné rozdělit výpočet dvou fází, které jsou schématicky znázorněny na následujícím obrázku. V první fázi byla na vzorek 1 umístěna vrstva grafitu 2 o emisivitě $\epsilon = 0,97$ (–) a na základě záznamu teplot z měření byla zjištěna teplota žárovky 3 – viz obr. 2.62 a). V druhé fázi byla použita zjištěná teplota žárovky 3 a stejným postupem byla doladěna hodnota emisivity pokoveného (lesklého) povrchu vzorku 1 – viz obr. 2.62 b). U obou modelů byla použita totožná geometrie i výpočetní síť akorát u modelu pro zjištění teploty žárovky byla vymodelována i vrstva grafitového prášku, který teplo rozvádí lépe ke krajům vzorku, jak bylo popsáno výše.



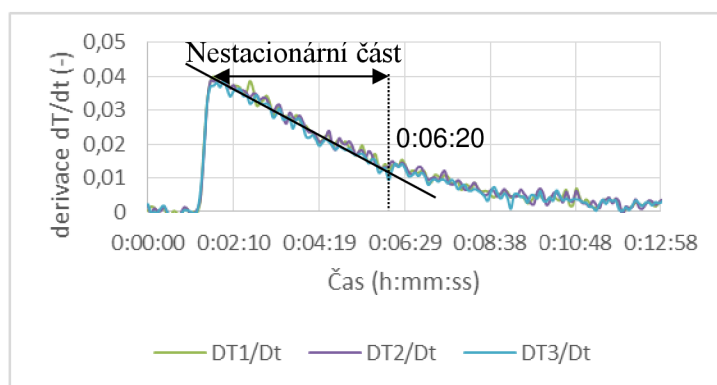
Obr. 2.62 Použité modely (a – Zjištění teploty žárovky, b – Zjištění emisivity vzorku. 1 vzorek, 2 vrstva grafitu, 3 náhrada reálného světelného zdroje, 4 izolace)

Zpracování a vyhodnocení naměřených dat

Výstupem z každého experimentu byl záznam teploty uvnitř termostatické komory a teplotního vývoje vzorku v čase. Data byla zpracována do grafů. Pro každé měření byla určena neustálená a ustálená část teplotního vývoje pomocí derivace teploty v čase viz vzorec (2.9). K další analýze emisivity byla použita pouze teplotně neustálená část měření. Konec neustálené části byl stanoven podle změny směrnice přímkou proložené daty derivace teploty podle času obr. 2.63.

$$\text{Derivace teploty v čase} \quad \dot{T} = \frac{dT}{dt}, \quad (2.9)$$

kde T je teplota, t je čas.



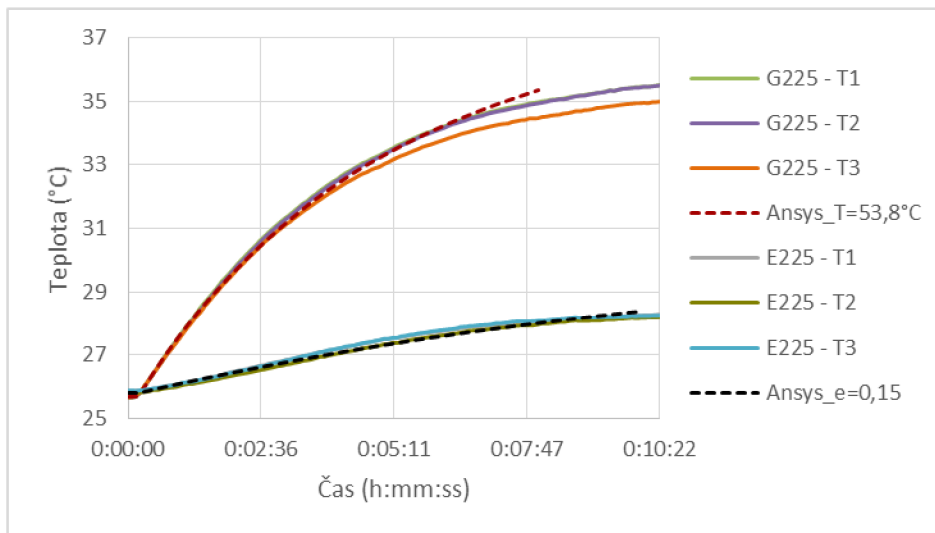
Obr. 2.63 Příklad stanovení konce neustálené části teplotního vývoje

Bylo provedeno celkem osm experimentů pro dva různé povrchy vzorku. Nejprve byly proměřeny všechny konfigurace s originálním (pokoveným) povrchem a následně byl vzorek přestříkán grafitovým sprejem a postup byl zopakován. Každý vzorek byl měřen pro dvě vzdálenosti mezi vzorkem a tepelným zdrojem a dvě úrovně teploty okolí.

Tab. 2.18 Plán měření

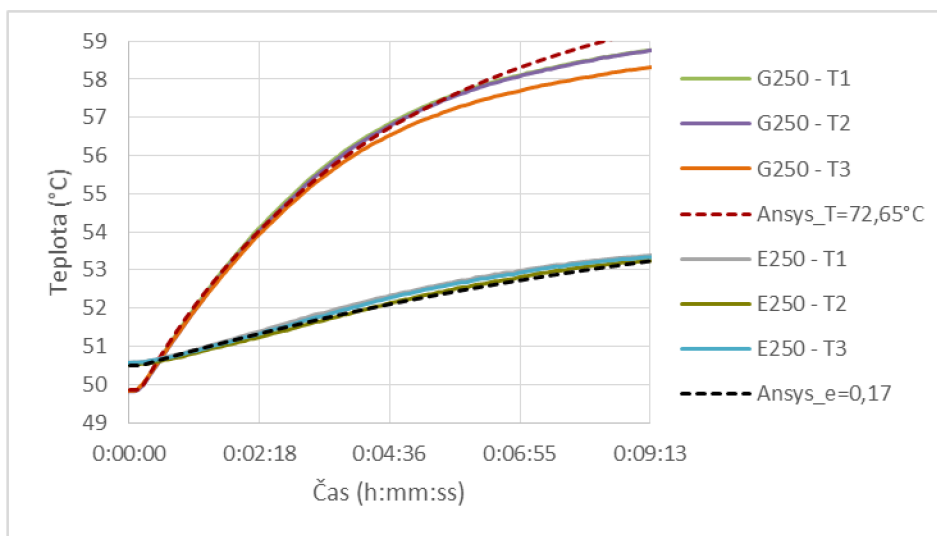
| Grafitový sprej | Pokovený povrch | Vzdálenost (mm) | Teplota okolí (°C) |
|-----------------|-----------------|-----------------|--------------------|
| G225 | E225 | 200 | 25 |
| G250 | E250 | 200 | 50 |
| G125 | E125 | 100 | 25 |
| G150 | E150 | 100 | 50 |

V následujících grafech jsou zobrazeny měřené teploty ze zadní strany vzorku T_1 až T_3 , které jsou proloženy vypočítaným průběhem teploty uprostřed vzorku. Nejdříve byla zjištěna pro danou konfiguraci měření teplota světelného zdroje, která je označena v grafech Ansys_T a následně emisivita pokoveného povrchu a její odpovídající průběh teploty označen Ansys_e.



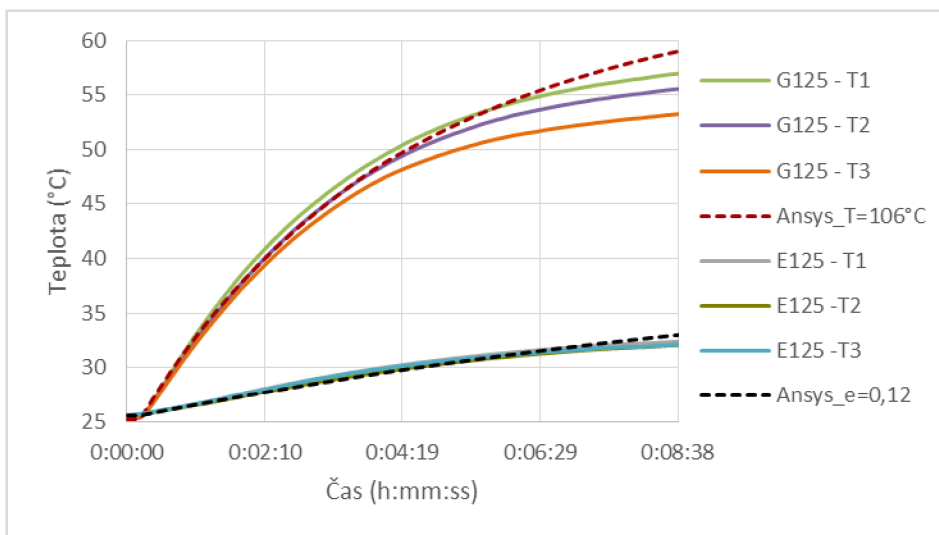
Obr. 2.64 Výsledky pro vzdálenost 200 mm, Tok 25 °C (G225 grafitový nástřík, E225 pokovený povrch)

U konfigurace 200 mm, 25 °C byl ze změřených teplot na vzorku s grafitovým nástříkem určen konec teplotně neustálené části na 6 min a 20 sekund. Pro tento časový úsek byla ze simulací vypočtena teplota tepelného zdroje na 53,8 °C. V druhé fázi byl z měřených teplot pro vzorek s originálním povrchem opět určen konec teplotně neustálené části, která byla do 8 min a 30 sekund. Zjištěná teplota zdroje byla použita pro dopočítání hodnoty emisivity na $\epsilon = 0,15$ (-).



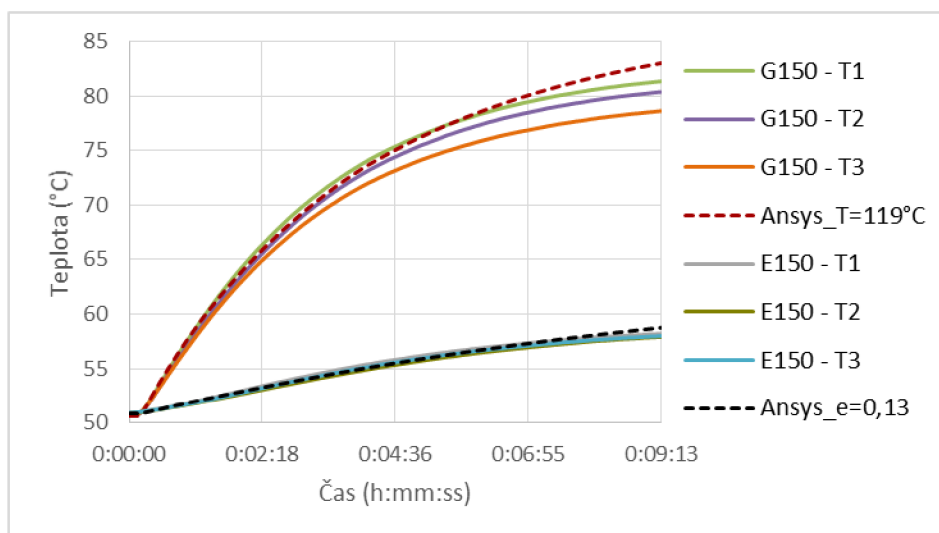
Obr. 2.65 Výsledky pro vzdálenost 200 mm, Tok 50 °C (G225 grafitový nástřík, E225 pokovený povrch)

U konfigurace 200 mm, 50 °C byl ze změřených teplot na vzorku s grafitovým nástříkem určen konec teplotně neustálené části na 5 min a 30 sekund. Pro tento časový úsek byla ze simulací vypočtena teplota tepelného zdroje na 72,65 °C. V druhé fázi byl z měřených teplot pro vzorek s originálním povrchem opět určen konec teplotně neustálené části, která byla do 8 min a 40 sekund. Zjištěná teplota zdroje byla použita pro dopočítání hodnoty emisivity na $\epsilon = 0,17$ (-).



Obr. 2.66 Výsledky pro vzdálenost 100 mm, Tok 25 °C (G225 grafitový nástřík, E225 pokovený povrch)

U konfigurace 100 mm, 25 °C byl ze změřených teplot na vzorku s grafitovým nástříkem určen konec teplotně neustálené části na 5 min a 54 sekund. Pro tento časový úsek byla ze simulací vypočtena teplota tepelného zdroje na 106 °C. V druhé fázi byl z měřených teplot pro vzorek s originálním povrchem opět určen konec teplotně neustálené části, která byla do 8 min a 38 sekund. Zjištěná teplota zdroje byla použita pro dopočítání hodnoty emisivity na $\epsilon = 0,12$ (-).



Obr. 2.67 Výsledky pro vzdálenost 100 mm, Tok 50 °C (G225 grafitový nástřík, E225 pokovený povrch)

U konfigurace 100 mm, 50 °C byl ze změřených teplot na vzorku s grafitovým nástříkem určen konec teplotně neustálené části na 5 min a 46 sekund. Pro tento časový úsek byla ze simulací vypočtena teplota tepelného zdroje na 119 °C. V druhé fázi byl z měřených teplot pro vzorek s originálním povrchem opět určen konec teplotně neustálené části, která byla do 8 min a 38 sekund. Zjištěná teplota zdroje byla použita pro dopočítání hodnoty emisivity na $\epsilon = 0,13$ (-).

Při porovnání výsledků vypočítaných emisivit pro stejnou vzdálenost vzorku od radiačního zdroje je dosaženo dobré opakovatelnosti. Pro vzdálenost 100 mm byla vypočítaná emisivita $\epsilon_{(Tok25^{\circ}C)} = 0,12$ (-) a $\epsilon_{(Tok50^{\circ}C)} = 0,13$ (-). Pro vzdálenost 200 mm byla vypočítaná emisivita $\epsilon_{(Tok25^{\circ}C)} = 0,15$ (-) a

$\varepsilon_{(T_{ok50^{\circ}C})} = 0,17$ (-). Z těchto výsledků je patrný vliv vzdálenosti vzorku od radiačního zdroje. Zvolit optimální vzdálenost mezi vzorkem a tepelným zdrojem je klíčové pro správnost dosažených výsledků. Příliš velká vzdálenost nebude dostatečně ohřívat vzorek, a proto bude velmi obtížné změřit ohřev a následně naladit numerický model. V opačném případě bude vzorek natolik blízko, že k jeho ohřevu bude docházet vlivem radiace a přirozené konvekce od ohřátého vzduchu v blízkosti zdroje. Rovněž zvolený radiační zdroj musí mít, co nejvíce homogenní rozložení tepelného toku. Byla testována i varianta žárovky s reflektorem, kdy bylo docíleno vyšší úrovně tepelného toku. Tento přístup byl ovšem nevhodný z důvodu nehomogenního záření. Na vzorku vznikaly místa s lokálně zvýšenou teplotou, což bylo zaznamenáno rozdílnými měřeními teplotami termočlánků na zadní straně. Měření povrchů s nízkou emisivitou je problematické právě kvůli nízké absorpci tepla, čímž je takové měření velmi citlivé na mírné změny způsobené například: drobnými výkyvy okolní teploty nebo přenastavením měřené konfigurace (poloha, vzdálenost a natočení tepelného zdroje). Dosažené výsledky prokázaly, že vyvinutá metoda funguje. Ovšem vypočítaná hodnota emisivity je vyšší, než je běžně literaturou udávaná hodnota, která je 0,8 až 0,1. Příčinou může být přílišné zjednodušení výpočtového modelu, u kterého nebylo modelováno okolní proudění vzduchu. Jeho chladicí účinky byly nahrazeny koeficientem přestupu tepla na povrchu modelu. Rovněž byl použit pouze základní model radiace (Surface-to-Surface).

2.9. Měření tepelné vodivosti

Pro účely numerických simulací jsou běžně materiály charakterizovány pouze konstantní parametry, což může být pro přesné teplotní simulace světlometů problém. Teplotní management u automobilových světlometů, které využívají moderních světelných zdrojů (např. LED čipů, OLED nebo laser) je velice důležitý. Teplotní zatížení světlometů je během provozu výrazně odlišné. Nejvyšších teplot je dosahováno v blízkosti zdrojů světla. Mnohdy je použitý materiál vystaven podmínkám, které jsou blízko jeho teplotním limitům, což klade i vyšší nároky na přesnost teplotních simulací. Proto je vhodné, aby i materiálové vlastnosti použité v numerických simulacích byly přesněji stanovené. Teplotně závislá materiálová data jsou výhodnější pro dosahování přesnějších výsledků. V rámci dizertační práce byla vyvinuta metoda měření tepelného toku závislého na teplotě. Byly provedeny série měření různých plastových materiálů běžně používaných při konstrukci automobilových světlometů. Cílem bylo matematicky popsat změnu tepelné vodivosti na základě proměnné teploty vzorku, jenž by mohla být použita společností Škoda Auto a.s. pro přesnější nastavení simulací světlometů.

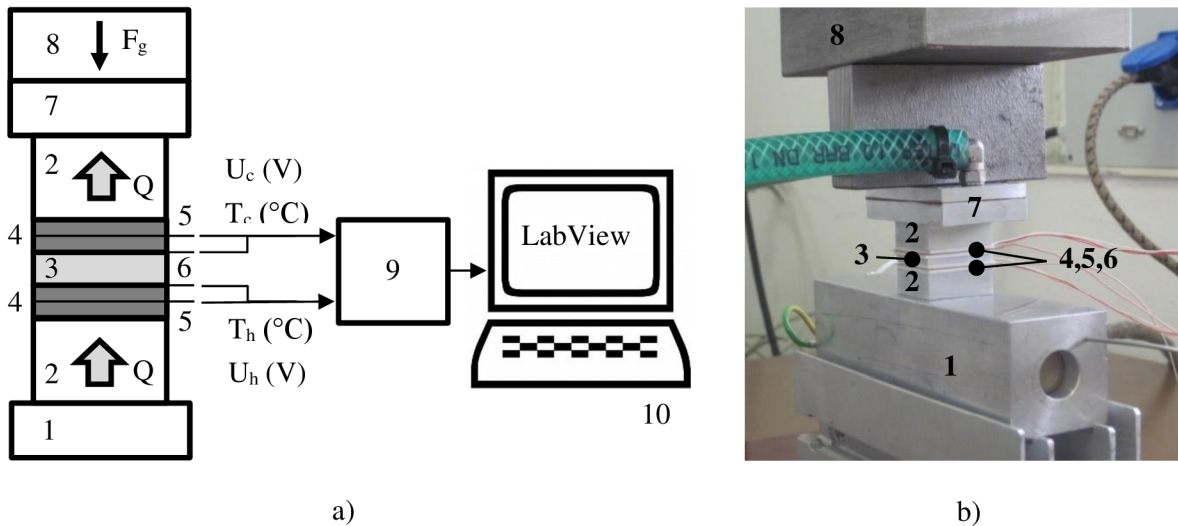
Metodika je vyvinuta pro měření tepelné vodivosti materiálů použitých při konstrukci světlometů. Hlavní princip je výměna tepla stacionárním vedením přes měřený vzorek, který je umístěn mezi zdroj tepla a chladič. Teplo proudí z teplejšího místa do chladnějšího. Teplota v materiálu se nejvíce mění v kolmém směru na chlazený a ohříváný povrch, proto se ostatní směry ve výpočtu zanedbávají. Pro vyhodnocení je využito ustálené (stacionární) části měření tepelného toku, jenž matematicky popisuje Fourierův zákon – viz vzorec (2.1).

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

kde \dot{q}_x je tepelný tok ve směru x , λ je tepelná vodivost, $\frac{dT}{dx}$ je teplotní gradient ve směru x .

$$\lambda = \dot{q}_x \frac{\Delta x}{(T_h - T_c)}, \quad (2.2)$$

kde λ je součinitel tepelné vodivosti, Δx je tloušťka měřeného materiálu, T je teplota, index h náleží ohřívávanému povrchu a index c chlazenému povrchu.



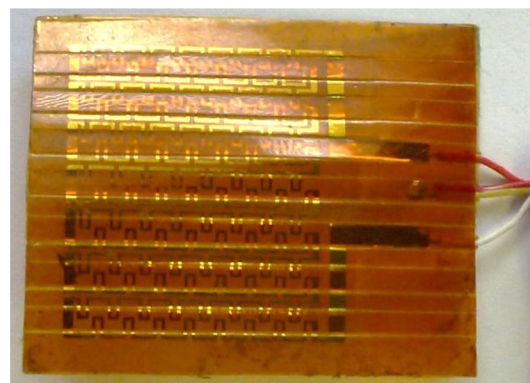
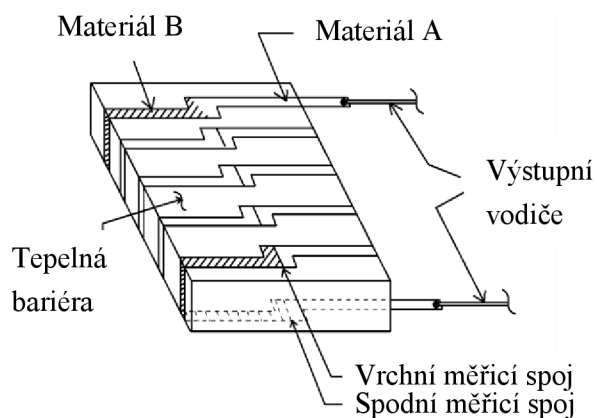
Obr. 2.68 Měření tepelné vodivosti (a – Schéma, b – Reálné zařízení, 1 topení, 2 hliníková kostka, 4 silikonové gummy, 5 snímač tepelného toku, 6 termočlánky, 7 chladič, 8 závaží, 9 měřicího zařízení, 10 počítač)

Zařízení k měření tepelné vodivosti je tvořeno regulovatelným topením 1, na kterém je položena hliníková kostka 2 o rozměrech vzorku 3. Pro zajištění dobrého kontaktu po celé ploše jsou umístěny z obou stran vzorku silikonové gummy 4 potřené vodivou pastou mezi, které je vložen snímač tepelného toku (Omega HFS-4) 5 pro stranu s topením (index h) a chladičem (index c). V ustáleném stavu dávají oba snímače totožnou hodnotu. Na plastový vzorek 3 čtvercového průřezu (20 mm na 20 mm) jsou z obou stran nalepeny tenké drátové termočlánky 6 pro záznam teplot teplého a studeného povrchu. Takto nachystaný vzorek 3 je následně vložen mezi snímače tepelného toku 5. Nakonec se umístí druhá hliníková kostka 2, na kterou je položen vodní chladič 7. Celá sestava je zatížena závažím 8, které zaručí stejnou přitlačnou sílu pro všechny měření. Data z experimentu jsou vyčítány pomocí měřicího zařízení 9 od společnosti National Instruments a vše je ovládáno přes počítač 10 s programem LabView.

Hlavní součástí měřicího zařízení je snímač tepelného toku od firmy Omega typ HFS-4, což je tenká ohebná destička o rozměrech 28 mm × 35 mm × 0,18 mm, která funguje jako diferenční měřič teploty na dvou protilehlých površích kolmých na směr tepelného toku. V senzoru je zabudováno 112 termočlánkových spojů na horní a spodní straně – viz obr. 2.69. Zabudované termočlánky produkují napětí, které je následně přepočítáno pomocí senzitivity udávané v kalibračním listu senzoru na tepelný tok, který má jednotky⁶ BTU/ft² h⁻¹ a pomocí přepočetni konstanty 1 BTU/ft² h⁻¹ = 3,1546 W m⁻² je převeden na základní jednotky. V posledním kroku je ze známé tloušťky vzorku a změřené teploty ohřivaného (T_h) a chlazeného povrchu (T_c) zjištěna hodnota tepelného toku pro danou teplotu vzorku dle rovnice (2.2).

$$\dot{q} = 3,1546 \frac{U}{\text{senzitivita}} \quad (2.10)$$

⁶ BTU – British thermal unit, ft² – čtvereční stopy, h – hodina



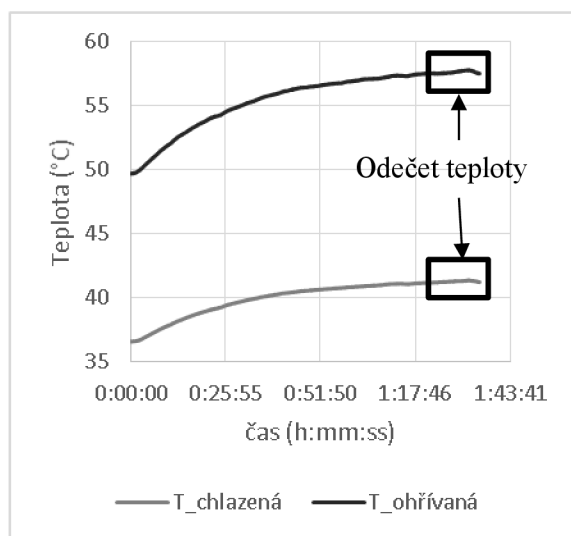
a)

b)

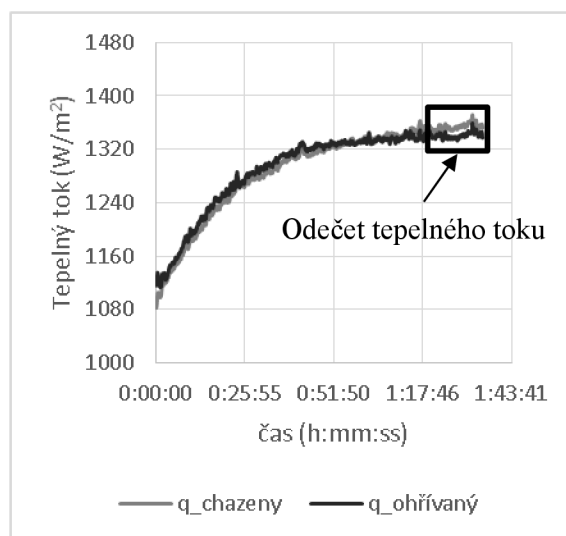
Obr. 2.69 Konstrukce senzoru Omega HFS-4 (a – Schéma [51], b – Reálný senzor)

Po sestavení zařízení s měřeným materiálem se proměřovala tepelná vodivost pro různé teploty, aby bylo možno zmapovat její tepelnou závislost.

Příkon topení byl regulován, než bylo na vzorku dosaženo požadované teploty. Poté byly odečteny hodnoty teplot chlazeného a ohřívaného povrchu a tepelný tok.



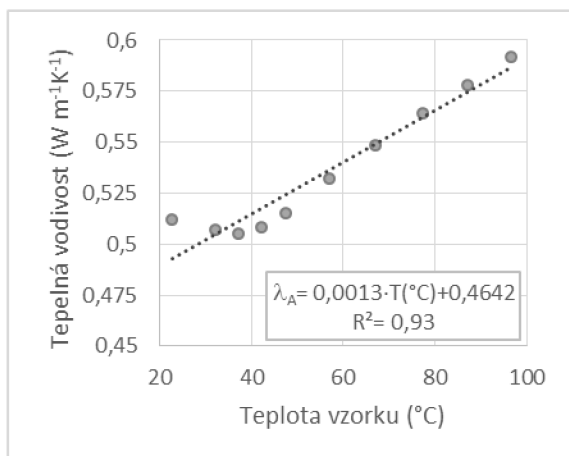
a)



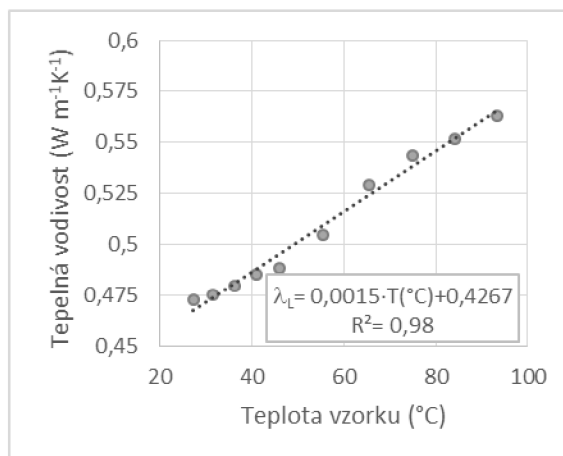
b)

Obr. 2.70 Příklad naměřených dat (a – Teploty, b – Tepelný tok)

Tepelná vodivost vzorků byla proměřena v teplotním rozsahu (25 až 95) °C, což je průměrná teplota chlazeného a ohřívaného povrchu. Měřený vzorek byl umístěn mezi senzory tepelného toku, kde byl ohříván pomocí regulovatelného topení. Při dosažení ustáleného stavu byly odečteny hodnoty teplot a tepelného toku – viz obr. 2.70, jak bylo popsáno na počátku kapitoly. Z rozdílu teplot a tepelného toku procházejícího přes vzorek byla stanovena tepelná vodivost pro konkrétní teplotu vzorku. Následovně se celý proces opakoval, až do proměření zadaného teplotního rozsahu. Výsledky byly proloženy rovnicí přímky pro jednodušší zadávání do materiálových knihoven výpočetních softwarů.



a)



b)

Obr. 2.71 Tepelná vodivost pro materiály (a – APEC, b – Průhledný Lexan)

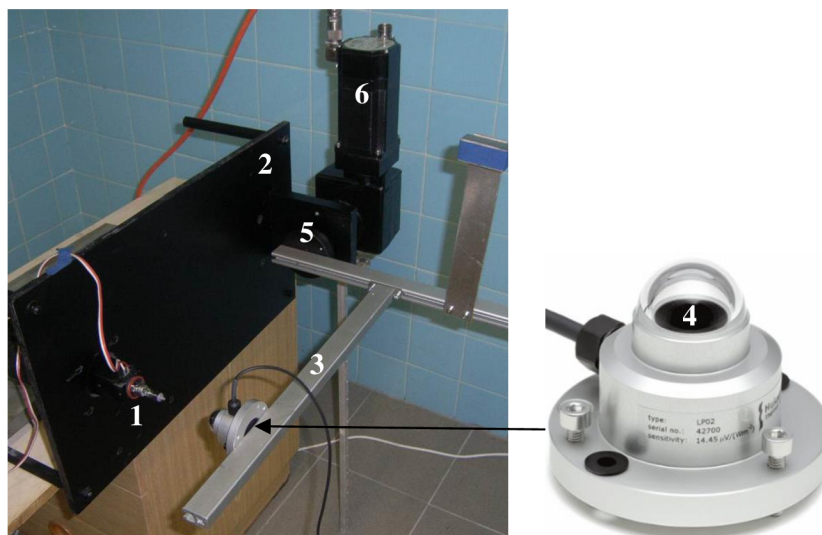
Z naměřených dat je vidět, že tepelná vodivost u obou materiálů v měřeném rozsahu 20 °C až 100 °C lineárně roste. U materiálu APEC z 0,5 W m⁻¹K⁻¹ na 0,6 W m⁻¹K⁻¹, což je nárůst o 20 %. Pro druhý měřený materiál průhledný Lexan tepelná vodivost stoupla z 0,475 W m⁻¹K⁻¹ na 0,565 W m⁻¹K⁻¹, což je nárůst o 19 %.

Během měření bylo prokázáno, že tepelná vodivost je teplotně závislá veličina, což může být důležité. Pro aplikace automobilových světlometů jsou typické materiály plasty, které charakterizuje velmi nízká tepelná vodivost a to řádově v desetinách W m⁻²K⁻¹. Při takto nízkých hodnotách může i zdánlivě nevýrazná změna hrát důležitou roli a to hlavně v kritických místech, kde se teplota materiálu blíží k jeho limitům.

2.10. Měření prostorových tepelných výkonů světelných zdrojů

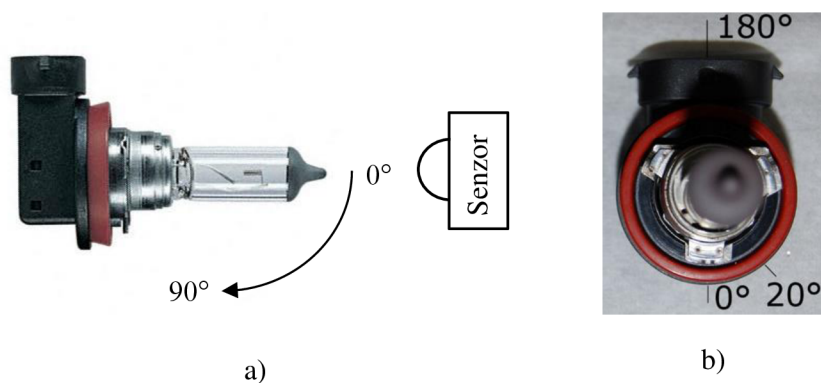
Pro zpřesnění teplotních simulací světlometů používajících světelné zdroje s vysokým radiačním výkonem (halogenové žárovky) byla v rámci dizertační práce pro společnost Škoda Auto a.s. vyvinuta metoda mapování prostorového tepelného výkonu světelných zdrojů za pomoci pyranometru sensoru pro měření slunečního radiačního výkonu. Změřené tepelné toky charakterizující prostorové zmapování jednotlivých žárovek byly použity pro přesnější nastavení okrajových podmínek numerických simulací a lepší pochopení rozložení tepelného zatížení vnitřních částí světlometu. Touto metodou byly proměřeny dvě žárovky H8 a P21, které se běžně používají v automobilových světlometech.

Měřená žárovka 1 je upevněna do přídržovací konstrukce 2 do výchozí polohy 0 stupňů – viz obr. 2.73 b). Ve vzdálenosti 100 mm od žárovky 1 je na rameno 3 připevněn pyranometr 4 sensor tepelného toku (Hukseflux LP02), který se otáčí kolem čepu 5 v 90 stupňovém intervalu. Polohování ramene 3 je zajištěno pomocí krokového motoru 6, který senzorem 4 postupně natáčel.



Obr. 2.72 Zařízení pro měření prostorového rozložení tepelného toku žárovek (1 žárovka, 2 přídržovací konstrukce, 3 rameno senzoru, 4 senzor tepelného toku, 5 bod otáčení senzoru, 6 krokový motor)

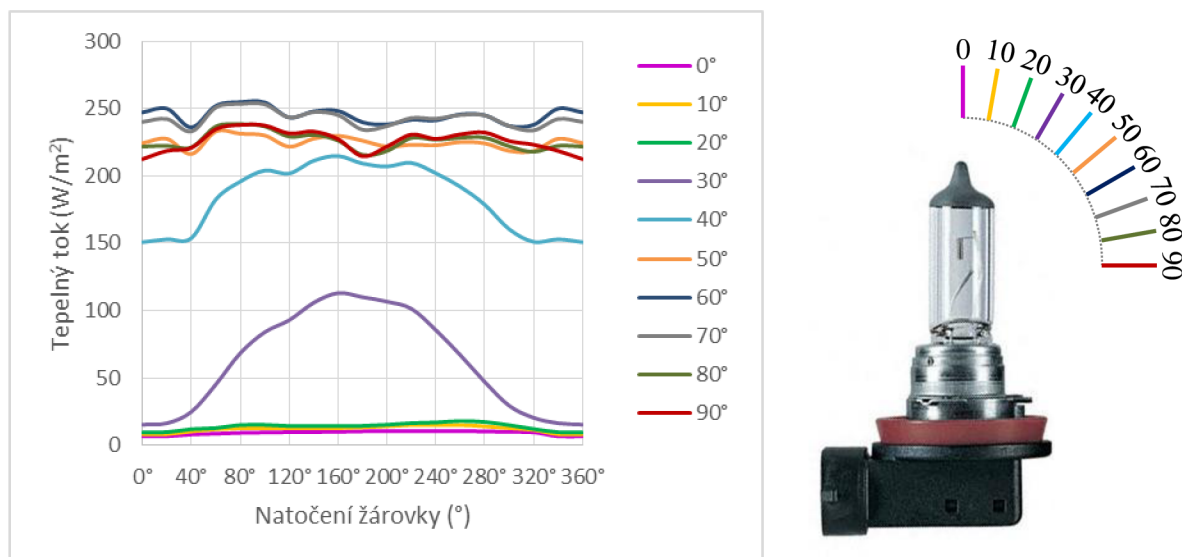
Při měření bylo postupováno, tak že žárovka 1 byla upevněna do výchozí pozice 0 stupňů – viz obr. 2.73 b) v držáku 2. Následně senzor tepelného toku 4 vykonával kruhový pohyb kolem žárovky a zmapoval tepelný tok v 90 stupňovém úhlu s krokem 10 stupňů – viz obr. 2.73 a). V každé poloze senzor 4 zastavil na 20 sekund, aby došlo k ustálení měřeného tepelného toku. Po proměření pozice byla žárovka 1 pootočena v držáku 2 o 20 stupňů a proces byl zopakován, dokud nebyl zmapován tepelný tok kolem celé žárovky 1. Celkem bylo proměřeno 180 bodů v půlkulovém prostoru kolem žárovky.



Obr. 2.73 Mapování prostorového tepelného toku (a – Otáčení ramene se senzorem, b – Natačení žárovky)

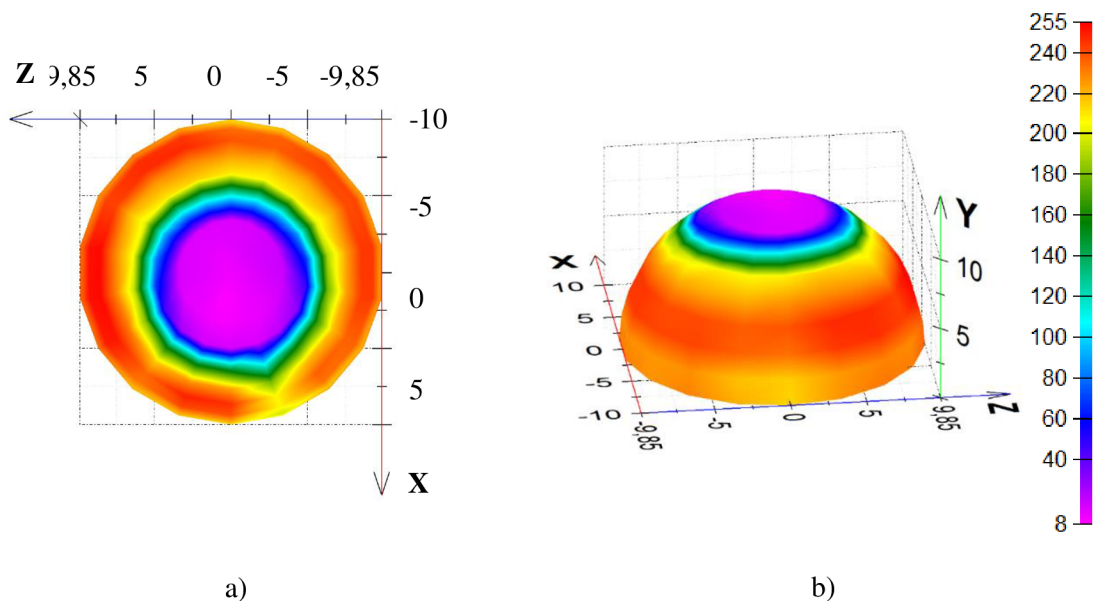
Naměřené hodnoty tepelného toku jsou zpracovány do grafů, jenž vykreslují 10 křivek pro 10 poloh natočení senzoru kolem žárovky (0° až 90°) a ty jsou zobrazeny na natočení žárovky od 0° do 360° . Pro lepší vizualizaci jsou data prezentovány pomocí softwaru Chart3D, jehož autorem je Ing. Michal Pohanka, Ph.D – viz obr. 2.75 a obr. 2.77.

Byly měřeny dva typy halogenových žárovek H8 a P21, které se používají pro vnější osvětlení vozidla, ale mají v provozu rozdílné použití. Žárovka H8 je vzhledem ke svému příkonu 35 W používána ve světlometech výhradně pro hlavní světelné funkce, jako je dálková, tlumená a mlhová funkce. U žárovky P21 je příkon nižší 21 W, proto není používána pro osvětlování vozovky, ale pro směrovou signalizaci, brzdové a zadní mlhové světlo.



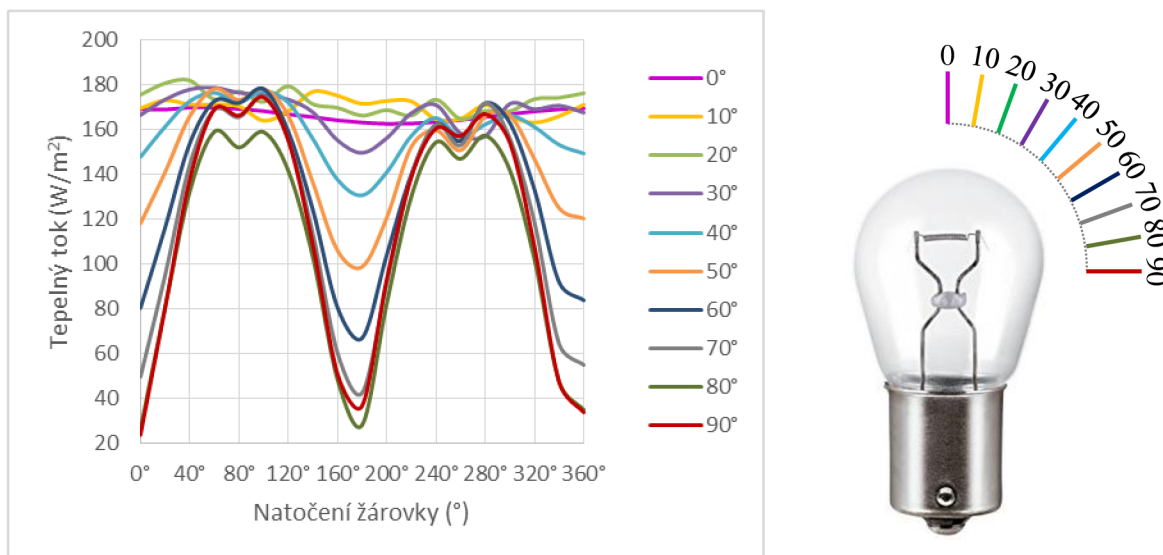
Obr. 2.74 Měření tepelný tok žárovkou H8

Pro měření žárovky H8 dosahuje tepelný tok od 0° do 20° (natočení senzoru) minimální hodnoty kolem 11 W m^{-2} , což je způsobeno krycím nátěrem na horní části žárovky. Od 30° se začíná tepelný tok zvyšovat s maximem ve 113 W m^{-2} . Tepelný tok dále roste a pro 40° již dosahuje 233 W m^{-2} . Od úhlu natočení senzoru 50° je již tepelný tok ustálený kolem hodnoty 233 W m^{-2} .



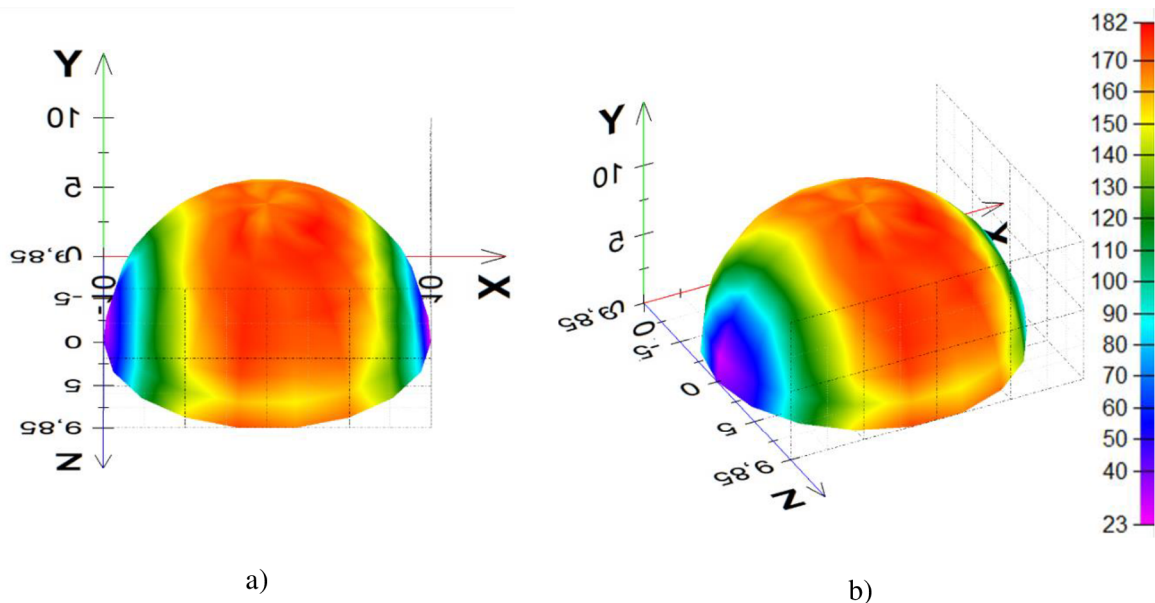
Obr. 2.75 Rozložení tepelného toku žárovkou H8 (a – Horní pohled, b – 3D pohled)

Naměřené hodnoty tepelného toku jsou po obvodu žárovky homogenní. Kolem pozice [0;10;0] je nejnižší hodnota tepelného toku, což je zapříčiněno krycím nátěrem ve vrchní části žárovky.



Obr. 2.76 Měřený tepelný tok žárovkou P21

Na měřených datech pro žárovku P21 je patrné, že tepelný tok je závislý na úhlu natočení žárovky. Homogenního toku s hodnotou kolem 170 W m^{-2} žárovka dosahuje pouze pro úhly natočení senzoru 0° až 20° . Při dalším zvětšování úhlu senzoru začne hodnota tepelného toku pro natočení žárovky 180° a 0° klesat. V těchto pozicích tepelný tok poklesne, až na $36,5 \text{ W m}^{-2}$, což je o 78 % méně oproti výchozí hodnotě 170 W m^{-2} .



Obr. 2.77 Rozložení tepelného toku žárovkou P21 (a – Boční pohled, b – 3D pohled)

Kolem pozic $[-10;0;0]$ a $[10;0;0]$ jsou nejnižší hodnoty tepelného toku, což odpovídá úhlu natočení žárovky 0° a 180° . Tyto poklesy jsou zapříčiněny konstrukcí vlákna, které prochází rovinou XY.

Největší vliv na homogenní rozložení tepelného toku má pozice wolframového vlákna. U žárovky H8 bylo vlákno paralelně s osou žárovky, proto výsledky tepelného toku nejsou závislé na natočení žárovky a průměrná hodnota byla kolem 233 W m^{-2} . U P21 byla pozice vlákna kolmá na osu, proto dochází pro natočení žárovky 0° a 180° k velkému poklesu. Dalším rozdílem bylo měření v oblasti horní plochy žárovek, kde H8 díky krycímu nátěru dosahovala výrazně nižšího tepelného toku, kdežto P21, zde dosahovala nejvyšších hodnot 170 W m^{-2} . Rozdíly byly dány funkcí žárovek při provozu vozidla. H8 má příkon 35 W a je využívána výhradně při osvětlování vozovky. Zároveň z hlediska bezpečnosti je snahou výrobců, co nejvíce omezit oslňování proti jedoucím vozidlům, proto je žárovka pokryta ve vrchní části nátěrem. Žárovka P21 je využívána pro signalizační funkce, což je dáno i nižším příkonem 21 W .

Závěr

V rámci dizertační práce byla vyvinuta metoda testování odmlžování, která slouží k porovnání rychlosti odmlžení předního skla různých automobilových světlometů, kombinací přetlaků na odvětrávacích otvorech a množstvím vypařované vody. Měření odmlžování světlometů bylo složeno ze dvou částí. Zamlžovací fáze, kdy bylo do světlometu pomocí vyvinutého zvlhčovače vypařeno známé množství vody, a odmlžovací fázi, kdy byl na odvětrávací otvory v těle světlometu přiveden tlakový vzduch a sledován postup odmlžení předního skla. Během celého měření byly zaznamenávány důležité fyzikální veličiny a průběžně pořizovány fotografie s vývojem kondenzátu. Největším přínosem této metodiky je zcela unikátní přístup k zamlžování pomocí vyvinutého patentově chráněného zvlhčovače (číslo přihlášky 2015-385, číslo dokumentu 305743) dávajícího přesné množství vody do vnitřního prostoru světlometu. Zvolený přístup umožňuje snadnou implementaci naměřených dat do numerických simulací pomocí okrajových a počátečních podmínek a zároveň zkracuje časovou náročnost na několik hodin podle množství vypařované vody. Běžně jsou pro testování využívány klimakomory, ve kterých je umístěný světlomet vystaven vysoké relativní vlhkosti a následným zchlazením je přebytečná vlhkost zkondenzována. Ovšem tento přístup je časově velice náročný trvá desítky hodin, až několik dnů.

K záznamu vývoje kondenzátu byla využita ověřená metoda dvou separátních světelných zdrojů umístěných v různých polohách nad světlometem. Pro jeden časový okamžik byly pořizeny dvě fotografie v rychlém sledu po sobě, které byly nasvětleny z různých směrů. Výsledný snímek byl následně složen z těchto dvou fotografií. Tento přístup dává mnohem lepší výsledky než běžně používaný jednobodový zdroj světla (typicky blesk u fotoaparátu), jelikož snižuje množství nežádoucích odlesků, které zhoršují následné vyhodnocení fotografie. Tato hypotéza byla potvrzena i podílem nevyhodnotitelných oblastí, které klesly z 10 % pro jednobodový zdroj na 3 % pro dvou bodový zdroj světla. Pořizené fotografie byly vyhodnoceny vyvinutým programem, který pomocí obrazové analýzy automaticky detekoval zamlžené a odmlžené oblasti. Program u aktuální fotografie porovnával intenzitu každého pixelu s referenční, která reprezentovala zcela zamlžený stav, a při překročení hraniční hodnoty bylo místo tohoto pixelu označeno jako odmlžené. Výskyt kondenzace odpovídal realitě pozorované na originálních fotografiích pořizených během experimentu.

K výpočtu simulace odmlžení byl použit software ANSYS Fluent verze 17.2 s geometrií vnitřního prostoru světlometu. Pro predikci kondenzace byl zahrnut fyzikální model Eulerian wall film (EWF). Simulace byla rozdělena do dvou hlavních částí. Zamlžovací fáze, kdy byla nejdůležitější okrajová podmínka hmotnostní tok ve dně geometrie zvlhčovače a pomocí EWF byla uvolněná vlhkost kondenzována na vnitřní ploše předního skla. U následné odmlžovací fáze byl hmotnostní tok vypnut a na odvětrávací otvory byl nastaven přetlak. Výsledkem simulací byly kontury rozložení kondenzátu na předním skle v čase, které byly porovnány s vyhodnocenými fotografiemi z experimentů, a časový průběh procentuální změny omlžené a zamlžené oblasti. K verifikaci simulací byly použity tři konfigurace měření s přetlaky 60 Pa na odvětrávacích otvorech a množstvím vypařované vody 1 ml, 1,5 ml a 2 ml. Simulace byly porovnány s experimenty, které pomocí času potřebnému k odmlžení 80 % plochy předního skla. Při porovnání výsledků bylo dosaženo velmi dobré shody v procentuálním úbytku zamlžené oblasti, kdy bylo možno ze simulací velice dobře stanovit čas potřebný pro odmlžení předního skla. Při dosažení 80 % hranice odmlžení byl rozdíl mezi simulacemi a měřeními v toleranci 2 minut, jednalo se tedy o zanedbatelný rozdíl. Porovnáním rozložení kondenzátu v jednotlivých časových úsecích byl patrný lokální rozdíl, ale tendence ústupu kondenzátu byly stejné. Největší rozdíly byly patrné na počátku procesu, kdy simulace zůstává 100 % zamlžená déle, než bylo detekováno na

vyhodnocených snímcích z měření. I přes tyto nedostatky lze považovat dosažené výsledky za dobré. Především pak pro určení celkového času potřebného k odmlžení.

Další část práce byla věnována teplotnímu zatížení světlometů. Na základě provedených měření byl stanoven vliv zabudování termočlánků typu K na měřené teploty. Byly použity různé způsoby zabudování a konstrukce termočlánků, které byly vlepeny do hliníkové desky ohříváné od 60 °C do 180 °C. Negativní vliv na měřené teploty měl především plášťový termočlánek vlepený kolmo na povrch, který představoval žebro chladiče. Nejlepších výsledků bylo dosaženo s tenkým drátovým termočlánkem s teflonovou izolací, který byl vlepen paralelně s povrchem. U tohoto termočlánku nedocházelo k odvodu tepla z měřeného místa díky izolaci a malému průměru drátu (\varnothing 0,25 mm). Další výhodami jsou malé rozměry, které umožní instalaci i ve stísněných prostorách, snadná tvarová ohebnost a velice malá plocha měřicího místa.

Na základě experimentů byl stanoven vliv světelného zdroje na měřené teploty plastových vzorků s nízkou emisivitou (pokovený povrch) a vysokou emisivitou. Termočlánky byly vlepeny do ozařovaného a stíněného povrchu, který měřil reálnou teplotu vzorku. Měření probíhalo v termostatické komoře s teplotou 25 °C a 50 °C, ve které byl vzorek v různých vzdálenostech ozařován světelnými zdroji (LED – studený zdroj a halogenovou žárovkou – zdroj s radiační složkou). Z naměřených dat byly teploty ozařovaného povrchu nejvíce zkresleny v případě pokoveného vzorku ozařovaného žárovkou. Teploty byly, až o 16 % vyšší než teplota vzorku pro nejbližší vzdálenost 50 mm od žárovky a teploty okolí 25 °C. Příčinou byla vysoká emisivita lepidla, která ve srovnání s originálním povrchem pohlcovала více tepelné energie a lokálně ohřívала měřené místo. V případě měření černého vzorku ozařovaného žárovkou byl rozdíl v měřených teplotách pro vzdálenost 50 mm od světelného zdroje a teplotu okolí 25 °C na ozařované straně o 7 % vyšší. Pro zvyšující se teplotu okolí a rostoucí vzdálenost tato odchylka klesala. Pro měření s LED světelným zdrojem byla odchylka teplot ozařované strany v porovnání teploty vzorku do 3 %, což byla zanedbatelná hodnota.

V rámci dizertační práce byla vyvinuta patentově chráněná nestacionární metoda stanovení emisivity lesklých povrchů (číslo přihlášky 2014-835, číslo dokumentu 305705), která je v porovnání s běžně používanými přístroji pracujícími na principu infračervené spektrometrie s Fourierovou transformací a disperzní spektrometrie, jednoduchá a finančně nenáročná. Plastový vzorek se zabudovaným termočlánkem byl ozařován zdrojem tepelného záření. Měření bylo složeno ze dvou částí. V první části byl zaznamenán nárůst teploty vzorku o neznámé (hledané) emisivitě, který byl ozařován tepelným zdrojem. V druhé části byla na povrch vzorku nanášena vrstva o známé emisivitě a postup byl opakován. Následně byl vytvořen výpočtový model a na základě zaznamenaných teplot z druhého měření byla inverzním postupem zjištěna hodnota tepelného toku. Po dosazení tepelného toku do modelu pro první měření byla zjištěna hledaná emisivita lesklého povrchu. Pro ověření metody byla provedena série měření pro teploty okolí 20 °C a 50 °C a vzdálenosti 100 mm, 200 mm mezi vzorkem a tepelným zdrojem. Hodnoty emisivity, vypočítané z numerických simulací naladěných dle měření, byla následující: Emisivita plastového vzorku s pokoveným povrchem pro vzdálenost 200 mm byla v rozmezí 0,15 pro okolní teplotu 25 °C a 0,17 pro okolní teplotu 50 °C. Zvolená vzdálenost 100 mm byla příliš malá, protože teplota vzorku byla ovlivněna tepelným polem samotného zdroje. Vypočítaná hodnota emisivity byla vyšší než je běžně uváděna (0,8 až 0,1), což mohlo být způsobeno nastavením numerické simulace, která používala pouze zjednodušený model radiace (Surface-to-Surface) a neobsahovala proudění vzduchu kolem vzorku. Jeho chladicí účinky byly nahrazeny koeficientem přestupu tepla na povrchu modelu.

Byla rovněž vyvinuta metoda měření tepelné vodivosti plastových materiálů používaných při konstrukci světlometů. Měřený vzorek byl umístěn mezi regulovatelné topení a chladič, čímž bylo docíleno tepelného toku přes měřený materiál, který byl zaznamenáván senzory tepelného toku. Sensory byly přiloženy na chlazený a ohříváný povrch vzorku. Z naměřeného tepelného toku byla pomocí Fourierova zákona, popisujícího výměnu tepla stacionárním vedením, vypočítána tepelná vodivost vzorku pro teplotní rozsahy 25 °C až 95 °C. Byly měřeny dva plastové materiály používané ve světlometech, APEC a průhledný lexan. U obou materiálů tepelná vodivost s teplotou vzorku lineárně rostla. Pro materiál APEC od 0,5 W m⁻²K⁻¹ pro 25 °C do 0,59 W m⁻²K⁻¹ pro 95 °C. Pro průhledný lexan od 0,475 W m⁻²K⁻¹ pro 25 °C do 0,565 W m⁻²K⁻¹ pro 95 °C.

Pro přesnější popis světelných zdrojů s vysokým radiačním výkonem (žárovky) byla vyvinuta metoda pro zmapování prostorového tepelného výkonu za pomoci pyranometru, senzoru pro měření slunečního radiačního výkonu. Měřený světelný zdroj byl zafixován držákem a před něj byl na otočné rameno umístěn senzor slunečního výkonu, který vykonával kruhový pohyb v rozsahu 0 ° až 90 °. Po té, co senzor proměřil celý rozsah 90 °, byla žárovka pootočena v držáku o 20 ° a celý proces opakován, dokud nebyl proměřen půlkulový prostor před žárovkou. Výsledná prostorová mapa byla složena ze 180 měřících bodů. Byly měřeny dvě žárovky s označením H8 a P21 používané ve světlometech. Z měřených dat byl patrný vliv orientace vlákna světelných zdrojů. Měřený tepelný tok u žárovky H8 s příkonem 35 W byl konstantní po celém obvodu s hodnotou 233 W m⁻², což bylo důsledek pozice vlákna, které bylo umístěno paralelně s osou. U žárovky P21 s příkonem 21 W bylo vlákno umístěno kolmo na osu, proto měl změřený tepelný tok po obvodu dvě maxima o hodnotě 175 W m⁻² a dvě minima 36,5 W m⁻². Tento rozdíl představoval pokles tepelného toku o 78 %.

V počátečních fázích vývoje světlometů jsou v dnešní době velice silným a často využívaným nástrojem numerické simulace, které dokáží nejlépe předpovědět charakter fyzikálních procesů za provozu. Tato práce propojuje simulační a experimentální přístup a vytváří tak stabilní základy pro další výzkum, vývoj a optimalizaci automobilových světlometů v oblasti kondenzace, teplotního namáhání a způsobu měření teplot. Díky těmto poznatkům může dojít k dalšímu prohloubení znalostí o odmlžování světlometů, zlepšení designu za účelem snížení doby odmlžování, přesnějšímu popisu teplotnímu rozložení a zvýšení bezpečnosti v běžném provozu.

Seznam použitých zdrojů

- [1] WANG, Ben a Jianzhong JIAO. Studies for Headlamp Optical Design Using LEDs. *SAE Technical Papers*. 2004, (2004-01-0434), 41-49. DOI: 10.4271/2004-01-0434. Dostupné také z: <http://papers.sae.org/2004-01-0434/>
- [2] LEKSON, Matthew a Jianzhong JIAO. Study of Tubular Volume Light Source Intensity Distribution. *SAE Technical Papers*. 1998, (980320), 99-103. DOI: 10.4271/980320. Dostupné také z: <http://papers.sae.org/980320/>
- [3] BRUNBERG, Jonah a Mikael ASPELIN. *CFD Modelling of Headlamp Condensation*. Göteborg, Švédsko, 2011. Dostupné také z: <http://publications.lib.chalmers.se/records/fulltext/148760.pdf>. Magisterská práce. Chalmers University of Technology.
- [4] HOINES, Lilian, Joseph BIELECKI a Matthew COHN. Effect of Exterior Airflow on Automotive Lamp Venting. *SAE Technical Papers*. 1999, (1999-01-0696), 53-57. DOI: 10.4271/1999-01-0696. Dostupné také z: <http://papers.sae.org/1999-01-0696/>
- [5] FOLKS, W. a Douglas KREYSAR. Front Fog Lamp Performance. *SAE Technical Papers*. 2000, (2000-01-0434), 47-55. DOI: 10.4271/2000-01-0434. Dostupné také z: <http://papers.sae.org/2000-01-0434/>
- [6] HOINES, Lilian a Jianzhong JIAO. Environment Leading to Condensation in Automotive Lamps. *SAE Technical Papers*. 1998, (980316), 65-68. DOI: 10.4271/980316. Dostupné také z: <http://papers.sae.org/980316/>
- [7] PREIHS, Erik. Automotive Headlamp - Analytic Solution and Measurements of Condensation inside a Headlamp. *Nordic COMSOL Conference*. 2006.
- [8] DEANE, Brian. On-Car Evaluation-Methods to Understand Condensation in Headlamps. *SAE Technical Papers*. 2005, (2005-01-1450), 189-197. DOI: 10.4271/2005-01-1450. Dostupné také z: <http://papers.sae.org/2005-01-1450/>
- [9] HOINES, Lilian, Brant POTTER, Matthew LEKSON a Benjamin STRAUSS. Design Considerations in Exterior Automotive Courtesy Lighting. *SAE Technical Papers*. 1998, (980009), 45-49. DOI: 10.4271/980009. Dostupné také z: <http://papers.sae.org/980009/>
- [10] FUKAI, Shingo. Development of a Headlamp Mist Resistance Evaluation Method. *SAE Technical Papers*. 2001, (2001-01-0862). DOI: 10.4271/2001-01-0862. Dostupné také z: <http://papers.sae.org/2001-01-0862/>
- [11] WANG, Ben, Douglas KREYSAR a Jianzhong JIAO. Automotive Head Lamp Beam Pattern Uniformity Evaluation. *SAE Technical Papers*. 1996, (960789), 87-92. DOI: 10.4271/960789. Dostupné také z: <http://papers.sae.org/960789/>

- [12] DESAI, Deval. Technology and Styling Trends in Automotive Lighting in North America. *SAE Technical Papers*. 2005, (2005-01-1015), 163-169. DOI: 10.4271/2005-01-1015. Dostupné také z: <http://papers.sae.org/2005-01-1015/>
- [13] DRAPALA, Ewa. Experimental study on water condensation in automotive headlamp. *SAE Technical Papers*. 2010, (2010-01-1326). DOI: 10.4271/2010-01-1326. Dostupné také z: <http://papers.sae.org/2010-01-1326/>
- [14] POORMAN, Thomas, Joseph BIELECKI a Mojun CHANG. Methodology to Evaluate Automotive Lamp Venting. *SAE Technical Papers*. 2003, (2003-01-0648), 753-757. DOI: 10.4271/2003-01-0648. Dostupné také z: <http://papers.sae.org/2003-01-0648/>
- [15] DEPONTI, Alberto, Fabio DAMIANI, Luca BRUGATI, Lorenzo BUCCHIERI a Sergio ZATTONI. Modelling of condensate formation and disposal inside an automotive headlamp. *4th European Automotive Simulation Conference*. 2009. Dostupné také z: http://www.enginsoft.com/assets/img/tecnology/cfd/02.AL_EASC_2009.pdf
- [16] BELSARE, Sharad, Benjamin STRAUSS a Jianzhong JIAO. Temperature Predictions Using Thermal Data-Base and Design Sensitivity Analysis. *SAE Technical Papers*. 1999, (1999-01-0699), 73-76. DOI: 10.4271/1999-01-0699. Dostupné také z: <http://papers.sae.org/1999-01-0699/>
- [17] GUZEJ, Michal a Jaroslav HORSKY. Experimental verifications and numerical thermal simulations of automobile lamps. *Materiali in tehnologije* [online]. 2016, **50**(3), 289-293 [cit. 2017-12-31]. DOI: 10.17222/mit.2014.149. ISSN 15802949. Dostupné z: <http://mit.imt.si/Revija/izvodi/mit163/guzej.pdf>
- [18] ŽLEBEK, Michal. *Osvětlení automobilu*. Brno, 2013. Dostupné také z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=64553. Bakalářská práce. VUT v Brně.
- [19] LIU, Hong, Jin LI a Yong WANG. Fast Computing Model for Thermal Field of Auto Lamp. *Key Engineering Materials*. 2008, , 783-788. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.364-366.783. Dostupné také z: <http://www.scientific.net/KEM.364-366.783>
- [20] MARTÍNEK, Michal. *Osvětlovací technika moderních vozidel a měření dohlednosti na dosvit hlavních světlometů*. Brno, 2011. Dostupné také z: http://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=38847. Magisterská práce. VUT v Brně.
- [21] Halogenová žárovka NARVA H4 60/55W. *GM elektronik* [online]. b.r. [cit. 2015-06-29]. Dostupné z: <http://www.gme.cz/halogenova-zarovka-narva-h4-60-55w-p516-126>
- [22] WEAK VIOLET LIGHT MEANS YOUR XENON LAMP IS ABOUT TO FAIL. *CasLightBlog* [online]. b.r. [cit. 2015-06-29]. Dostupné z: <http://www.carlightblog.com/2014/09/26/weak-violet-light-means-your-xenon-lamp-is-about-to-fail/>

- [23] Luxeon power LEDs (5W) from K2 series. *Transfer Multisort Elektronik Sp. z o.o.* [online]. b.r. [cit. 2015-06-29]. Dostupné z: http://www.tme.eu/html/EN/luxeon-power-leds-5w-from-k2-series/ramka_6966_EN_pelny.html
- [24] BLOOMFIELD, Russell. Temperature Measurement Errors in Automotive Lighting. *SAE Technical Papers*. 2001, (2001-01-0859), 247-258. DOI: 10.4271/2001-01-0859. Dostupné také z: <http://papers.sae.org/2001-01-0859/>
- [25] VINCENS, Adam, Fadi EL-KHATIB a Mojun CHANG. Influence of Aluminum Coating Thickness on Automotive Lamps. *SAE Technical Papers*. 2008, (2008-01-0488), 39-45. DOI: 10.4271/2008-01-0488. Dostupné také z: <http://papers.sae.org/2008-01-0488/>
- [26] JANCO, Marcel. Osvetlenie vozidla, svetlomety a ich diagnostika. *Autorubrik* [online]. b.r. [cit. 2015-06-29]. Dostupné z: <http://www.autorubik.sk/clanky/osvetlenie-vozidla-svetlomety-a-ich-diagnostika>
- [27] Light projection technology. *Xrayvision.net* [online]. b.r. [cit. 2017-11-23]. Dostupné z: <https://xrayvision.net/lighting-facts/light-projection-technology/>
- [28] NOLTE, Sascha a Thorsten MASCHKIO. Development of a Software Tool for the Simulation of Formation and Clearance of Condensation in Vehicle Headlamps. *L-LAB*. 2007. Dostupné také z: http://www.l-lab.de/llab-de-de/assets/Files/PUB_Nolte_0103.pdf
- [29] HLOUŠEK, Jiří. *Termomechanika*. 1. vyd. Brno: VUT Brno, 1992, 297 s.
- [30] BERGMAN, T a Frank INCROPERA. *Fundamentals of heat and mass transfer*. 7th ed. / . Hoboken, NJ: Wiley, 2011, xxiii, 1048 p.
- [31] MACHÁČKOVÁ, Adéla a Radim KOCICH. *Sdílení tepla a proudění: učební text* [online]. Vyd. 1. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita, 2012, 1 DVD-ROM [cit. 2015-06-26]. Dostupné z: http://www.person.vsb.cz/archivcd/FMMI/STP/STP_FINAL_LAST.pdf
- [32] HOTTEL, Hoyt a Adel SAROFIM. *Přenos tepla zářením*. 1. vyd. Praha: SNTL, 1979, 499 s.
- [33] PAVELEK, Milan. *Termomechanika*. 1. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2011, 192 s.
- [34] STADTHERR, Dianna, Amine TALEB-BENDIAB, Yasushi NOYORI a Derek MALLORY. Usage of High Flux White LEDs for DRL and Front Turn Signal Lighting. *SAE Technical Papers*. 2005, (2005-01-0865), 896-907. DOI: 10.4271/2005-01-0865. Dostupné také z: <http://papers.sae.org/2005-01-0865/>
- [35] CHEN, Jie, Ben WANG a Amine TALEB-BENDIAB. LED Flux Measurement Methods for Automotive Lighting. *SAE Technical Papers*. 2006, (2006-01-0288), 233-243. DOI: 10.4271/2006-01-0288. Dostupné také z: <http://papers.sae.org/2006-01-0288/>
- [36] HOLMAN, J. a W. GAJDA. *Experimental methods for engineers*. 3d ed. New York: McGraw-Hill, 1978, xvi, 493 p.
- [37] ŠESTÁK, Jaroslav. *Měření termofyzikálních vlastností pevných látek: teoretická termická analýza*. 1. vyd. Praha: Academia, 1982, 345 s.

- [38] *Způsob měření emisivity lesklých povrchů*. 2016. Česká republika. 305705 Patent. Uděleno 30.12.2015. Zapsáno 10.02.2016.
- [39] EL-KHATIB, Fadi, Joseph BIELECKI a Thomas POORMAN. Design of Experiment Analysis of Thermal Variables that Affect Automotive Lighting CFD Temperatures. *SAE Technical Papers*. 2006, (2006-01-0490), 318-323. DOI: 10.4271/2006-01-0490. Dostupné také z: <http://papers.sae.org/2006-01-0490/>
- [40] POORMAN, Thomas, Joseph BIELECKI, Mojun CHANG, Sharad BELSARE a Fadi EL-KHATIB. Automotive Lighting Thermal Performance Prediction Methods. *SAE Technical Papers*. 2001, (2001-01-0858), 237-246. Dostupné také z: <http://papers.sae.org/2001-01-0858/>
- [41] POORMAN, Thomas, Joseph BIELECKI, Mojun CHANG a Fadi EL KHATIB. Evaluating Thermocouple Measurement Techniques for Automotive Lighting. *SAE Technical Papers*. 2004, (2004-01-0665), 99-104. DOI: 10.4271/2004-01-0665. Dostupné také z: <http://papers.sae.org/2004-01-0665/>
- [42] MORRIS, Alan a Reza LANGARI. *Measurement and instrumentation: theory and application*. Amsterdam: Academic Press, 2011, xxi, 617 s.
- [43] THERMOCOUPLES, sponsored a American MATERIALS. *Manual on the use of thermocouples in temperature measurement*. [6th printing]. Philadelphia, Pa: American Society for Testing and Materials, 1992.
- [44] CHANG, Mojun, Joseph BIELECKI a Thomas POORMAN. Empirically Based Water Condensation and Vapor Clearing Time Calculator for Automotive Lighting Assemblies. *SAE Technical Papers*. 2008, (2008-01-0489), 47-51. DOI: 10.4271/2008-01-0489. Dostupné také z: <http://papers.sae.org/2008-01-0489/>
- [45] BIELECKI, Joseph, Mojun CHANG a Thomas POORMAN. Understanding Water Vapor Gradients Conducive to Condensation in an Automotive Lamp. *SAE Technical Paper Series*. 2005, (2005-01-1448), 171-176. DOI: 10.4271/2005-01-1448. Dostupné také z: <http://papers.sae.org/2005-01-1448/>
- [46] HARPER, Charles. *Modern plastics handbook*. New York: McGraw-Hill, 2000, 1 v. (various pagings).
- [47] BIELECKI, Joseph, Mojun CHANG a Thomas POORMAN. The Effect of Environmental Conditions on Moisture Clearing Time in Automotive Lamps. *SAE Technical Papers*. 2003, (2003-01-0646), 91-95. DOI: 10.4271/2003-01-0646. Dostupné také z: <http://papers.sae.org/2003-01-0646/>
- [48] *Zařízení ke zvlhčení vnitřního prostoru světlometu*. 2016. Česká republika. 305743. Uděleno 13.01.2016. Zapsáno 24.02.2016.
- [49] ANSYS Customer Portal. *ANSYS Customer Portal* [online]. 2017 [cit. 2017-09-18]. Dostupné z: https://support.ansys.com/AnsysCustomerPortal/en_us/Knowledge%20Resources/Solutions/FLUENT/2042239
- [50] CURCIO, Joseph. *Adsorption and Condensation of Water on Mirror and Lens Surfaces*. 1976.

[51]Omega: HFS-3, HFS-4 Thin Film Flux Sensors. *User's Guide* [online]. OMEGA ENGINEERING, INC., 2010 [cit. 2017-12-13]. Dostupné z: <https://www.omega.com/manuals/manualpdf/m1844.pdf>

[52]GUZEJ, Michal, Jaroslav HORSKÝ, David GALLOVIČ a Pavel ČERNÝ. *Experimental verifications and numerical thermal simulations of automobile lamps*. 2016.

Seznam použitých symbolů

| <i>Symbol</i> | <i>Rozměr</i> | <i>Veličina</i> |
|-------------------------------|---------------------|---|
| A | $[m^2]$ | plocha vodiče |
| a | $[m^2 s^{-1}]$ | součinitel teplotní vodivosti |
| C | $[m]$ | obvod vodiče |
| c | $[J K^{-1}]$ | tepelná kapacita |
| c_p | $[J kg^{-1}K^{-1}]$ | měrná tepelná kapacita za konstantního tlaku |
| g | $[kg s^{-2}]$ | gravitační zrychlení |
| h | $[W m^{-2}K^{-1}]$ | součinitel přestupu tepla |
| i, j, k | $[-, -, -]$ | jednotkové vektory |
| L | $[m]$ | charakteristický rozměr |
| m | $[kg]$ | hmotnost |
| m_v | $[kg]$ | váha po nasycení polymeru vlhkostí |
| m_+ | $[kg]$ | přírůstek váhy polymeru |
| \dot{m}_s | $[kg s^{-1}]$ | zdroj hmoty na jednotkovou stěnu |
| P_Z | $[J]$ | teplo produkované elektrickými ztrátami v čipu |
| q | $[W s^{-1}]$ | energetický tok |
| \dot{Q} | $[W]$ | teplo odvedené termočlánkem z místa měření |
| \dot{q} | $[W m^{-2}]$ | hustota tepelného toku |
| $R_{TO(LED-O)}$ | $[K W^{-1}]$ | tepelný odpor mezi spojem čipu a okolím |
| T | $[K]$ | teplota |
| t | $[^{\circ}C]$ | teplota |
| T_f | $[K]$ | průměrná teplota tekutinového filmu |
| $T_{Ok}, T_{out}, T_{\infty}$ | $[^{\circ}C]$ | teplota okolí |
| T_{LED} | $[K]$ | teplota LED spoje |
| T_S | $[K]$ | teplota povrchu |
| U | $[W m^{-2}K^{-1}]$ | efektivní hodnota součinitele tepelné vodivosti |

| <i>Symbol</i> | <i>Rozměr</i> | <i>Veličina</i> |
|---------------|---------------------|---|
| \bar{v}_f | $[m s^{-1}]$ | průměrná rychlost tekutinového filmu |
| \bar{v}_l | $[m s^{-1}]$ | rychlost tekutinového filmu |
| x, y, z | $[m, m, m]$ | souřadnice kartézského souřadného systému |
| y_f | $[m]$ | výška tekutinového filmu |
| Δt | $[K]$ | rozdíl teplot mezi měřeným bodem a teplotou okolí |
| Δx | $[m]$ | tloušťka materiálu |
| γ | $[K^{-1}]$ | teplotní součinitel objemové roztažnosti |
| ε | $[-]$ | emisivita |
| λ | $[W m^{-1}K^{-1}]$ | součinitel tepelné vodivosti |
| λ_f | $[W m^{-1}K^{-1}]$ | součinitel tepelné vodivosti vzduchu |
| μ | $[kg m^{-1}s^{-1}]$ | dynamická viskozita |
| ν | $[m^2 s^{-1}]$ | kinematická viskozita |
| ρ_l | $[kg m^{-3}]$ | hustota kapaliny (vody) |
| σ | $[W m^{-2}K^{-4}]$ | Stefan-Boltzmannova konstanta |
| ∇_s | $[-]$ | povrchový gradient |

Seznam obrázků

| | |
|--|----|
| Obr. 1.1 Halogenový automobilový světlomet (a – Přední strana, b – Zadní strana)..... | 7 |
| Obr. 1.2 Druhy světelných zdrojů (a – Halogenová žárovka [21], b – Xenonová výbojka [22], c – LED čip [23])..... | 8 |
| Obr. 1.3 Konstrukční provedení reflektorů (a – Parabolický reflektor [26], b – Elipsoidní reflektor [26], c – Segmentový reflektor [27]) | 9 |
| Obr. 1.4 Teplotní interakce světlometu s okolím | 11 |
| Obr. 1.5 Tepelné poměry pro H1 halogenovou žárovku (1 – tepelný tok, 2 – světlo, 3 – konvekce kolem žárovky, 4 – vedení patiči) | 11 |
| Obr. 1.6 Měření svítivosti (a – 2π integrační koule, b – 4π integrační koule)[40]..... | 15 |
| Obr. 1.7 Záznam z měření tepelné vodivosti na přístroji FlashLine 4010 | 15 |
| Obr. 1.8 Příklady zabudovávání (a – Normální povrch, b – Transparentní povrch, c – LED čip)..... | 17 |
| Obr. 1.9 Absolutní vlhkost pro tlak okolí 1 atm a relativní vlhkost 30 % (a – Větší rozsah teplot, b – Detail křivky v blízkosti teploty 23°C) | 20 |
| Obr. 1.10 Teplota rosného bodu, pro tlak okolí 1 atm a relativní vlhkost 30 % (a – Větší rozsah teplot, b – Detail křivky v blízkosti teploty 23°C) | 20 |
| Obr. 1.11 Design přední části světlometů (a – Původní vyroben ze skla, b – Současný vyroben z transparentních plastů) [15]..... | 21 |
| Obr. 1.12 Testování odmlžení (a – Zkušebna, b – Model automobilu v reálné velikosti) [15]..... | 22 |
| Obr. 2.1 Schéma uspořádání měřicího zařízení (1 ventilátor, 2 vzdušník, 3 rozvody tlakového vzduchu, 4 regulace tlaku, 5 světlomet, 6 osvětlení kondenzátu, 7 fotoaparát)..... | 26 |
| Obr. 2.2 Měřicí zařízení pro odmlžovací testy | 26 |
| Obr. 2.3 První blok (a – Celkový pohled, b – Detail regulačního kohoutu, 1 vzdušník, 2 ventilátor, 3 hrubou regulací tlaku, 4 vlhkoměr, 5 rozvody tlakového vzduchu) | 27 |
| Obr. 2.4 Druhý blok (a – Celkový pohled, b – Hrubá regulace, c – Přesná regulace, 6 kohouty, 7 membránové ventily, 8 diferenční tlakoměry) | 27 |
| Obr. 2.5 Úpravy světlometu (a – Osazení předního skla čtyřmi termočlánky, b – Připojení odvětrávacích otvorů, c – Otvor pro zvlhčovač, d – Zabudovaná sonda)..... | 28 |
| Obr. 2.6 Třetí blok (a- Celkový pohled, b – Uchycení kamery, c – Pozice žárovek osvětlujících kondenzát, 9 kamera, 10 světelné zdroje)..... | 28 |
| Obr. 2.7 Měřicí zařízení pro odmlžovací testy v1.0 | 29 |
| Obr. 2.8 Měřicí zařízení pro odmlžovací testy v2.0 | 29 |
| Obr. 2.9 Finální měřicí zařízení pro odmlžovací testy v4.0 | 30 |

| | |
|---|----|
| Obr. 2.10 Zvlhčovač (a – 3D model, b – Popis, c – Reálné zařízení, 1 rezervoár, 2 dno rezervoáru, 3 topné těleso, 4 elektrické vodiče, 5 mříž, 6 teplotní čidlo, 7 pouzdro, 8 těsnící příruba, 9 otvory) | 33 |
| Obr. 2.11 Zvlhčovací zařízení (a – Poloha pro zavlhčení, b – Poloha během hlavní části experimentu) | 33 |
| Obr. 2.12 Ukázka postupu úpravy fotografií (a – levá původní, b – pravá původní, c – levá upravená, c – pravá upravená) | 36 |
| Obr. 2.13 Vliv velikosti oblasti filtru na hranici mezi zamlženou (červená) a odmlženou (zelená) oblastí (a – 0 pixelů bez filtru, b – 3 pixelů, c – 10 pixelů), modrá znázorňuje nevyhodnotitelné oblasti..... | 36 |
| Obr. 2.14 Vyhodnocený snímek bez použití filtru | 37 |
| Obr. 2.15 Ukázka vyhodnocené fotografie se znázorněnými důležitými oblastmi (zelená – odmlžená, červená – zamlžená, modrá – nevyhodnotitelná)..... | 38 |
| Obr. 2.16 Nasvětlení zepředu | 39 |
| Obr. 2.17 Nasvětlení seshora (a – Přední pohled, b – Horní pohled)..... | 39 |
| Obr. 2.18 Pozice jednotlivých termočlánků předního skla..... | 40 |
| Obr. 2.19 Pozice jednotlivých odvětrávacích otvorů | 41 |
| Obr. 2.20 Teploty na skle (a – V1p60, b – V1,5p60, c – V2p60)..... | 42 |
| Obr. 2.21 Teploty uvnitř světloometu (a – V1p60, b – V1,5p60, c – V2p60)..... | 43 |
| Obr. 2.22 Příkon zvlhčovače (a – V1p60, b – V1,5p60, c – V2p60)..... | 44 |
| Obr. 2.23 Relativní vlhkost s vyznačenými důležitými body: začátek a konec vypařování a konec chlazení skla (a – V1p60, b – V1,5p60, c – V2p60)..... | 45 |
| Obr. 2.24 Přetlaky na odvětrávacích otvorech (a – V1p60, b – V1,5p60, c – V2p60)..... | 46 |
| Obr. 2.25 Parametry vzduchu uvnitř světloometu (a – V1p60, b – V1,5p60, c – V2p60) | 47 |
| Obr. 2.26 Parametry vzduchu na vstupech (a – V1p60, b – V1,5p60, c – V2p60) | 48 |
| Obr. 2.27 Teploty světloometu a okolí (a – V1p60, b – V1,5p60, c – V2p60) | 49 |
| Obr. 2.28 Příklad zobrazení kondenzátu pro V1p60 v 720 sekundě (a – Kontury s plynulým přechodem, b – Dvě úrovně kontur)..... | 53 |
| Obr. 2.29 Průběh odmlžení V1p60 a jeho porovnání se simulací | 54 |
| Obr. 2.30 Průběh odmlžení V1,5p60 a jeho porovnání se simulací | 54 |
| Obr. 2.31 Průběh odmlžení V2p60 a jeho porovnání se simulací | 55 |
| Obr. 2.32 Porovnání výsledků odmlžení z experimentu V1p60 a simulace..... | 56 |
| Obr. 2.33 Porovnání výsledků odmlžení z experimentu V1,5p60 a simulace..... | 58 |
| Obr. 2.34 Porovnání výsledků odmlžení z experimentu V2p60 a simulace..... | 59 |
| Obr. 2.35 Blokové schéma prvního celku ovládacího programu | 60 |
| Obr. 2.36 Blokové schéma druhého celku ovládacího programu..... | 61 |

| | |
|---|----|
| Obr. 2.37 Blokové schéma třetího a čtvrtého celku ovládacího programu..... | 62 |
| Obr. 2.38 Příklad výsledků (a – Měření pomocí termočlánků zabudovaných ve světlometu, b – Vypočítané teplotní pole z numerických simulací a jeho porovnání s experimentem) | 63 |
| Obr. 2.39 Sestava experimentu (1 vzorek, 2 termočlánky, 3 topení, 4 ventilátor, 5 anemometr, 6 pyrometr, 7 multimetr)..... | 64 |
| Obr. 2.40 Testovací vzorky se zabudovanými termočlánky | 64 |
| Obr. 2.41 Rozměry vzorku S1 | 65 |
| Obr. 2.42 Rozměry vzorku S2 | 65 |
| Obr. 2.43 Rozměry vzorku S3 | 66 |
| Obr. 2.44 Rozměry vzorku S4 | 66 |
| Obr. 2.45 Odchylky teplot (%) vůči T_2 pro první měření, přirozená konvekce | 70 |
| Obr. 2.46 Odchylky teplot (%) vůči T_2 pro druhé měření, přirozená konvekce | 70 |
| Obr. 2.47 Odchylky teplot (%) vůči T_2 pro první měření, nucená konvekce 2 m s^{-1} | 71 |
| Obr. 2.48 Odchylky teplot (%) vůči T_2 pro druhé měření, nucená konvekce 2 m s^{-1} | 71 |
| Obr. 2.49 Měřicí obvod (a – Sestava v termostatické komoře, b – 3D model s bočním a předním pohledem, 1 termostatická komora, 2 teploměr, 3 držák vzorku, 4 vzorek, 5 topné těleso, 6 izolace, 7 hliníková fólie, 8 světelná zdroj, 9 držák světelného zdroje)..... | 73 |
| Obr. 2.50 Konstrukce vzorku (a – Přední strana, b – Zadní strana) | 73 |
| Obr. 2.51 Zabudovaný vzorek do izolace (a – Pokovený vzorek, b – Černý vzorek, c – Přelepená hliníková fólie) | 74 |
| Obr. 2.52 Pokovený vzorek (a – Detail termočlánků přední strany, b – Zadní strana) | 74 |
| Obr. 2.53 Černý vzorek (a – Detail termočlánků přední strany, b – Zadní strana) | 74 |
| Obr. 2.54 Vliv světelného zdroje v termostatické komoře (a – Experiment, b – Výsledky)..... | 75 |
| Obr. 2.55 Pokovený vzorek ozařovaný žárovkou H12, teplota okolí (a – $25 \text{ }^\circ\text{C}$, b – $50 \text{ }^\circ\text{C}$)..... | 76 |
| Obr. 2.56 Pokovený vzorek ozařovaný LED, teplota okolí (a – $25 \text{ }^\circ\text{C}$, b – $50 \text{ }^\circ\text{C}$)..... | 77 |
| Obr. 2.57 Černý vzorek ozařovaný žárovkou H12, teplota okolí (a – $25 \text{ }^\circ\text{C}$, b – $50 \text{ }^\circ\text{C}$) | 78 |
| Obr. 2.58 Černý vzorek ozařovaný LED, teplota okolí (a – $25 \text{ }^\circ\text{C}$, b – $50 \text{ }^\circ\text{C}$) | 79 |
| Obr. 2.59 Vzorek (a – Výkres s T_1 až T_3 , b – Zadní strana vzorku s T_1 až T_3 , c – Zabudovaný vzorek do izolace) | 81 |
| Obr. 2.60 Výpočetní síť vzorku (a – Standartní, b – Jemná)..... | 84 |
| Obr. 2.61 Srovnání výsledků teplot z obou výpočetních sítí | 85 |
| Obr. 2.62 Použité modely (a – Zjištění teploty žárovky, b – Zjištění emisivity vzorku. 1 vzorek, 2 vrstva grafitu, 3 náhrada reálného světelného zdroje, 4 izolace) | 85 |

| | |
|--|----|
| Obr. 2.63 Příklad stanovení konce neustálené části teplotního vývoje | 86 |
| Obr. 2.64 Výsledky pro vzdálenost 200 mm, Tok 25 °C (G225 grafitový nástřik, E225 pokovený povrch) 87 | |
| Obr. 2.65 Výsledky pro vzdálenost 200 mm, Tok 50 °C (G225 grafitový nástřik, E225 pokovený povrch) 87 | |
| Obr. 2.66 Výsledky pro vzdálenost 100 mm, Tok 25 °C (G225 grafitový nástřik, E225 pokovený povrch) 88 | |
| Obr. 2.67 Výsledky pro vzdálenost 100 mm, Tok 50 °C (G225 grafitový nástřik, E225 pokovený povrch) 88 | |
| Obr. 2.68 Měření tepelné vodivosti (a – Schéma, b – Reálné zařízení, 1 topení, 2 hliníková kostka, 4 silikonové gummy, 5 snímač tepelného toku, 6 termočlánky, 7 chladič, 8 závaží, 9 měřicího zařízení, 10 počítač) | 91 |
| Obr. 2.69 Konstrukce senzoru Omega HFS-4 (a – Schéma [51], b – Reálný senzor)..... | 92 |
| Obr. 2.70 Příklad naměřených dat (a – Teploty, b – Tepelný tok) | 92 |
| Obr. 2.71 Tepelná vodivost pro materiály (a – APEC, b – Průhledný Lexan) | 93 |
| Obr. 2.72 Zařízení pro měření prostorového rozložení tepelného toku žárovek (1 žárovka, 2 přídržovací konstrukce, 3 rameno senzoru, 4 senzor tepelného toku, 5 bod otáčení senzoru, 6 krokový motor) | 94 |
| Obr. 2.73 Mapování prostorového tepelného toku (a – Otáčení ramene se senzorem, b – Natačení žárovky) | 95 |
| Obr. 2.74 Měřený tepelný tok žárovkou H8 | 95 |
| Obr. 2.75 Rozložení tepelného toku žárovkou H8 (a – Horní pohled, b – 3D pohled) | 96 |
| Obr. 2.76 Měřený tepelný tok žárovkou P21..... | 96 |
| Obr. 2.77 Rozložení tepelného toku žárovkou P21 (a – Boční pohled, b – 3D pohled)..... | 97 |

Seznam tabulek

| | |
|--|----|
| Tab. 1.1 Plasty používané při výrobě automobilových světlometů [46] | 19 |
| Tab. 2.1 Skládání výsledků z levé a pravé fotografie..... | 37 |
| Tab. 2.2 Konfigurace experimentů odmlžování světlometů..... | 41 |
| Tab. 2.3 Nastavení řešiče Fluentu všech částí simulace | 50 |
| Tab. 2.4 Diskretizační schémata Fluentu všech částí simulace | 51 |
| Tab. 2.5 Rozdíl výsledků mezi experimenty a simulacemi | 54 |
| Tab. 2.6 Popis zabudovaných termočlánků typu – K..... | 67 |
| Tab. 2.7 Teploty (°C) na jednotlivých termočláncích, první měření | 68 |
| Tab. 2.8 Teploty (°C) na jednotlivých termočláncích, druhé měření | 69 |
| Tab. 2.9 Termočlánky vzorku | 75 |
| Tab. 2.10 Teploty (°C) z ustáleného stavu pro pokovený vzorek ozařovaný žárovkou H12 | 76 |
| Tab. 2.11 Teploty (°C) z ustáleného stavu pro pokovený vzorek ozařovaný LED | 77 |
| Tab. 2.12 Teploty (°C) z ustáleného stavu pro černý vzorek ozařovaný žárovkou H12 | 77 |
| Tab. 2.13 Teploty (°C) z ustáleného stavu pro černý vzorek ozařovaný LED | 78 |
| Tab. 2.14 Popis časových kroků transientního výpočtu teplot (s) | 82 |
| Tab. 2.15 Použité okrajové podmínky..... | 82 |
| Tab. 2.16 Termofyzikální vlastnosti použitých materiálů | 84 |
| Tab. 2.17 Grafit přepočít termofyzikálních vlastností pro tloušťku 0,25 mm | 84 |
| Tab. 2.18 Plán měření..... | 86 |

Vlastní publikace vztahující se k tématu dizertační práce

- GUZEJ, M. a HORSKY, J. Experimental verifications and numerical thermal simulations of automobile lamps. *Materiali in tehnologije* [online]. 2016, **50**(3), 289-293 [cit. 2017-12-31]. DOI: 10.17222/mit.2014.149. ISSN 15802949. Dostupné z: <http://mit.imt.si/Revija/izvodi/mit163/gujej.pdf>
- ZACHAR, M.; GUZEJ, M.; HORSKÝ, J. NUMERICAL THERMAL COMPARISON OF HEAT SINK MATERIALS FOR AUTOMOTIVE LED HEADLAMPS. In *ENGINEERING MECHANICS 2017*. 2017. p. 1078-1081. ISBN: 978-80-214-5497-2. Dostupné z: <http://engmechx.it.cas.cz/improc/2017/1078.pdf>

Seznam vlastních publikací

- GUZEJ, M.; BARTULI, E.; KRIŠTOF, O. Water jet cooling of aluminium alloy. In *Matel 2015 full texts of papers*. Ostrava: TANGER Ltd., 2015. p. 1-6. ISBN: 978-80-87294-58- 1. Dostupné z: <http://konsys2.tanger.cz/files/proceedings/21/papers/3801.pdf>
- KENNETH, B.; MORAVEC, R.; HORSKÝ, J.; GUZEJ, M. The Effect of Steel Composition on the Interfacial Heat Transfer Coefficients for the Secondary Cooling Zones in a Continuous Caster. In *AISTech 2014 Iron and Steel Technology Conference*. AIST Association for Iron&Steel Technology. Indianapolis: AISTech 2014, 2014. p. 2873-2880. ISBN: 9781935117421. ISSN: 1551-6997.
- HORSKÝ, J.; MORAVEC, R.; BLAZEK, K.; GUZEJ, M. THE EFFECT OF SPRAY WATER TEMPERATURE ON SECONDARY COOLING SPRAY HEAT TRANSFER COEFFICIENTS AND METHODS FOR IMPLEMENTING THE EFFECT IN A DYNAMIC COOLING CONTROL MODEL. In *Proceedings - 8th European Continuous Casting Conference*. Graz, Austria: ASMET, 2014. p. 1-10. ISBN: 978-3-200-03664- 2.
- KENNETH, B.; RUDOLF, M.; KAI, Z.; MICHAEL, L.; HONGBIN, Y.; GUZEJ, M.; HORSKÝ, J. Dynamic Simulation of Slab Centerline Behavior of the Continuous Casting Process during Large Speed Transitions and Their Effects on Slab Internal Quality. In *Steelsim 2013*. Ostrava: VŠB - Technical university of Ostrava, 2013. p. 1-12. ISBN: 978-80-260-3912-9.
- GUZEJ, M.; HORSKÝ, J. Stanovení intenzity chlazení během semikontinuálního odlévání hliníkových slitin. *Hutnické listy*, 2015, roč. LXVIII, č. 4, s. 20-25. ISSN: 0018-8069.
- KOMÍNEK, J.; GUZEJ, M.; HORSKÝ, J. Metodika vyhodnocování intenzity chlazení vodního paprsku dopadajícího na svislý povrch. *Hutnické listy*, 2015, roč. LXVIII, č. 4, s. 26-30. ISSN: 0018-8069.,

- HORSKÝ, J.; KOMÍNEK, J.; GUZEJ, M. Advanced methodology of determination water jet cooling intensity during the casting process. In *12th International Conference on Heat Transfer, Fluid Mechanics and Thermodynamics*. ASTFE, 2016. p. 685-688. ISBN: 978-1-77592-124-0. Dostupné z: https://repository.up.ac.za/bitstream/handle/2263/61906/Horsky_Advanced_2016.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Udělené patenty

- GUZEJ, M.; HORSKÝ, J. Zařízení ke zvlhčení vnitřního prostoru světlometu, číslo přihlášky 2015-385, číslo dokumentu 305743, datum přihlášení 08. 06. 2015, datum udělení patentu 13. 01. 2016
- GUZEJ, M.; HORSKÝ, J.; HRABOVSKÝ J. Způsob měření emisivity lesklých povrchů, číslo přihlášky 2014-835, číslo dokumentu 305705, datum přihlášení 01. 12. 2014, datum udělení patentu 30. 12. 2015

Funkční vzorky

- HORSKÝ, J.; GUZEJ, M. Stend na odmlžování automobilových světel; identifikační kód RIV/00216305:26210/13:PR27185; identifikační číslo 18707
- HRAZDIL, V.; GUZEJ, M.; KOMÍNEK, J.; BOKIŠOVÁ, L. Přístroj na obrábění plastových koncovek výměníků; identifikační kód RIV/00216305:26210/13:PR26644 ; identifikační číslo 23440
- HORSKÝ, J.; GUZEJ, M. Zvlhčovací zařízení; identifikační kód RIV/00216305:26210/13:PR27186; identifikační číslo 18707

Přílohy

Na následujících stránkách jsou kopie patentových spisů.