



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV ELEKTROTECHNOLOGIE

DEPARTMENT OF ELECTRICAL AND ELECTRONIC TECHNOLOGY

EMISIVITA A JEJÍ VLIV NA ODVOD TEPLA

EMISSION AND ITS IMPACT ON THE HEAT CONDUCTIVITY

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Jan Gančev

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Ivan Szendiuch, CSc.

BRNO 2016

ABSTRAKT:

Předkládaná práce se zabývá problematikou emisivity a jejího vlivu na odvod tepla. V první části jsou popsány základy tepelného managementu, problematika emisivity a jejího měření. V druhé, experimentální části, jsou měřením zjištěny hodnoty emisivity zkoumaných vzorků. Tyto hodnoty jsou poté využity jako výchozí podmínky pro tepelné simulace. V poslední části jsou srovnány naměřené a odsimulované výsledky a je vyhodnocen vliv emisivity na odvod tepla.

ABSTRACT:

This work deals with the issue of emissivity and its impact on the heat dissipation. The first part describes the basics of thermal management, the issue of emissivity and its measurement. In the second, experimental part, are dedicated the emissivity values of examined specimens. These values are then used as initial conditions for the thermal simulation. In the last part are compared the measured results and the simulated results and is evaluated the impact of emissivity for the heat dissipation.

KLÍČOVÁ SLOVA:

Tepelný management, emisivita, LED, dural, povrchová úprava, termokamera, termočlánek, spektrometr, simulace, ANSYS Icepak, chladič.

KEYWORDS:

Thermal management, emissivity, LED, duralumin, surface finish, thermal camera, thermocouple, spectrometer, simulation, ANSYS Icepak, heatsink.

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

GANČEV, J. Emisivita a její vliv na odvod tepla. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2016. 61 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Ivan Szendiuch, CSc.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svoji diplomovou práci na téma **Emisivita a její vliv na odvod tepla** jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

V Brně dne 26. května 2016

.....
podpis autora

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji vedoucímu diplomové práce doc. Ing. Ivanu Szendiuchovi, CSc. za metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a cenné rady při zpracování mé práce. Velký dík patří Ing. Martinu Sukovi, Ing. Zbyňku Makkimu, Ph.D. a Ing. Boleslavu Psotovi, Ph.D. za odbornou pomoc a jejich další cenné rady. Děkuji i firmě Automotive Lighting za poskytnuté kvalitní zázemí.

V Brně dne 26. května 2016

.....
podpis autora

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor **Elektrotechnická výroba a materiálové inženýrství**

Ústav elektrotechnologie

Student: Bc. Jan Gančev

ID: 146822

Ročník: 2

Akademický rok: 2015/16

NÁZEV TÉMATU:

Emisivita a její vliv na odvod tepla

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Proved'te rešerši v oblasti emisivity a jejího vlivu na odvod tepla do okolí. Navrhněte vhodnou měřicí metodu pro její experimentální zjišťování a proved'te měření na vybraných materiálech s rozdílnou povrchovou úpravou. Získaná data použijte pro simulace šíření tepla v programu Ansys.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Podle pokynů vedoucího práce.

Termín zadání: 8.2.2016

Termín odevzdání: 26.5.2016

Vedoucí práce: doc. Ing. Ivan Szendiuch, CSc.

Konzultant diplomové práce:

doc. Ing. Petr Bača, Ph.D., předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

Obsah

Úvod.....	8
1 Základy teplotního managementu	9
1.1 Přenos tepla vedením.....	9
1.1.1 Vedení tepla rovinnou stěnou.....	10
1.1.2 Vedení tepla válcovou stěnou.....	11
1.2 Přenos tepla konvekcí	12
1.3 Přenos tepla radiací.....	15
1.3.1 Zákony sálání	16
2 Emisivita.....	19
2.1 Závislost emisivity na struktuře povrchu.....	19
2.2 Závislost emisivity na teplotě tělesa	19
2.3 Závislost emisivity na vlnové délce.....	20
2.4 Závislost emisivity na směrových podmínkách.....	21
3 Způsoby určování emisivity.....	22
3.1 Určení emisivity z tabulek.....	22
3.2 Určení emisivity spektrometrem	23
3.3 Výpočtové metody.....	23
3.4 Bezvýpočtové metody	25
3.4.1 Využitím referenční emisivity.....	25
3.4.2 Použitím termoelektrického článku.....	26
3.4.3 Vytvoření otvoru ve vzorku	26
4 Experimentální část.....	27
4.1 Praktické měření	27
4.1.1 Měřicí vzorky	27
4.1.2 Popis měřicího prostoru	30
4.1.3 Popis měřících přístrojů	31
4.1.4 Výsledky měření	34
4.2 Simulace	40
4.2.1 ANSYS Icepak	40
4.2.2 Nastavení simulace.....	41
4.2.3 Výsledky simulace	45
4.3 Shrnutí výsledků	56
5 Závěr.....	58
6 Seznam zkratk	59
7 Literatura	60

Seznam obrázků

Obrázek 1 - Vedení tepla jednoduchou rovinnou stěnou [9].....	10
Obrázek 2 - Vedení tepla složenou rovinnou stěnou [9].....	11
Obrázek 3 - Vedení tepla jednoduchou a složenou válcovou stěnou [9]	12
Obrázek 4 - Přenos tepla prouděním [9]	15
Obrázek 5 - Otvor dutiny, který se jeví jako černé těleso [17]	15
Obrázek 6 - Wienův posouvací zákon [9].....	17
Obrázek 7 - $E_{0\lambda}$ dokonale černého tělesa v závislosti na λ a teplotě zdroje záření [16].....	18
Obrázek 8 - Závislost emisivity na vlnové délce [3].....	20
Obrázek 9 - Poloprostor [3].....	21
Obrázek 10 - Spektrální závislost emisivity hliníku a oceli při teplotě 200 °C [10].....	23
Obrázek 11 - Závislost hustoty zářivého toku černých těles E_0 na teplotě T [3]	24
Obrázek 12 - Výběr bodů při použití materiálu s referenční emisivitou [7]	25
Obrázek 13 - Ukázka vzorků: 1) černěný, 2) pískovaný, 3) leštěný	27
Obrázek 14 - Mahr MarSurf PS1 na měření drsnosti [13]	28
Obrázek 15 - OSRAM OSTAR LED čip [14]	28
Obrázek 16 - Umístění LED čipu na vzorek	29
Obrázek 17 - Umístění termočlánků	29
Obrázek 18 - Měřicí pracoviště	30
Obrázek 19 - Termokamera FLIR SC640 [6]	31
Obrázek 20 - Datalogger ALMEMO 710 [4]	31
Obrázek 21 - Feasa™ LED spektrometr [5]	32
Obrázek 22 - FEASA™ software [5]	32
Obrázek 23 - Zdroj [12]	33
Obrázek 24 - Ukázka měřicího protokolu a význam použitých zkratk	34
Obrázek 25 - Příklad termogramu při I = 600 mA	35
Obrázek 26 - Závislost emisivity na teplotě pro TC00 a TC01	36
Obrázek 27 - Závislost emisivit vzorků na jejich teplotě	37
Obrázek 28 - Závislost emisivit vzorků na jejich teplotě 2	37
Obrázek 29 - Závislost teplot vzorků na proudovém zatížení.....	38
Obrázek 30 - Základní okno programu ANSYS Icepak.....	40
Obrázek 31 - Model vzorku (pohled zdola)	41
Obrázek 32 - Model kartonového boxu.....	41
Obrázek 33 - Umístění modelu v cabinetu	41
Obrázek 34 - Nastavení bloku chladiče.....	42
Obrázek 35 - Nastavení bloku LED	42
Obrázek 36 - Nastavení - menší mesh.....	43
Obrázek 37 - Nastavení – větší mesh	43
Obrázek 38 - Nastavení – global mesh.....	44
Obrázek 39 - Základní parametry simulace	44
Obrázek 40 - Základní nastavení simulace	44
Obrázek 41 - Rozložení tepla - černěný vzorek (při I = 600mA)	45
Obrázek 42 - Rozložení tepla - leštěný vzorek (při I = 600mA).....	46
Obrázek 43 - Závislost teplot vzorků (SIM00) na proudu	46
Obrázek 44 - Závislosti teploty povrchu vzorku na jeho drsnosti.....	47
Obrázek 45 - Proudění - pískovaný (řez rovinou Z)	48
Obrázek 46 - Proudění - pískovaný (isometricky)	48
Obrázek 47 - Proudění - černěný (řez rovinou Z)	49
Obrázek 48 - Proudění - černěný (isometricky)	49

Obrázek 49 - Proudění - leštěný (řez rovinou Z).....	50
Obrázek 50 - Proudění - leštěný (isometricky)	50
Obrázek 51 - Proudění - kartáčovaný (řez rovinou Z)	51
Obrázek 52 - Proudění - kartáčovaný (isometricky)	51
Obrázek 53 - Model chladiče_1	53
Obrázek 54 - Rozložení tepla při $\varepsilon = 0,95$ pro chladič_1	53
Obrázek 55 - Model chladiče_2	54
Obrázek 56 - Rozložení tepla při $\varepsilon = 0,95$ pro chladič_2	54
Obrázek 57 - Závislost teplot modelů chladičů na jejich emisivitě	55

Seznam Tabulek

Tabulka 1 - Hodnoty koeficientů C a n v závislosti na součinu Gr·Pr [18]	14
Tabulka 2 - Hodnoty součinitele přestupu tepla [18]	14
Tabulka 3 - Příklad tabulkových hodnot emisivit [8]	22
Tabulka 4 - Drsnosti povrchů zkoumaných vzorků	28
Tabulka 5 - Parametry LED OSRAM OSTAR U1A3 01 [15]	29
Tabulka 6 - Parametry termokamery FLIR SC640 [6]	31
Tabulka 7 - Parametry dataloggeru a termočlánku [4]	32
Tabulka 8 - Parametry spektrometru [5]	32
Tabulka 9 - Parametry napájecího zdroje [12]	33
Tabulka 10 - Ukázka naměřených dat (vzorek: kartáč_1)	34
Tabulka 11 - Výsledky měření emisivity	35
Tabulka 12- Naměřené světelné výstupy spektrometrem	39
Tabulka 13 - Hodnoty výkonu tepelného zdroje použité v simulaci.....	39
Tabulka 14 - Výsledky tepelné simulace	45
Tabulka 15 - Závislost teplot povrchu na jeho drsnosti	47
Tabulka 16 - Výsledky rychlosti proudění vzduchu	52
Tabulka 17 - Výsledky min. a max. teplot pro chladič_1	54
Tabulka 18 - Výsledky min. a max. teplot pro chladič_2	55
Tabulka 19 - Shrnutí porovnání zjištěných teplot	56

Úvod

V dnešní době, stejně jako elektronické součástky a obvody, tak i přední světlomety v automobilech procházejí neustálým kvalitativním vývojem, který je samozřejmě spojen se vznikem nových poznatků, řešení a konstrukčních uspořádání. Hlavním trendem ve vývoji předních světlometů je zvýšení životnosti prvků emitujících světelné záření, snížení energetické náročnosti světlometu, produkce světla s teplotou blížíící se kvalitě denního světla, vyšší možnosti využití prostoru ve světlometech apod. Toho všeho se dosáhlo zavedením BASIC LED technologie, která využívá jako zdroj světla LED. Další možností je bezpečnosti na komunikacích pomocí automatického přepínání mezi dálkovými a potkávacími světly na bázi ADVANCED LED technologie [2].

Výsledkem je sofistikovaný přední světlomet, založený na nejmodernější polovodičové technologii. Vzniká tak problém s odvodem tepla, které může zapříčinit nadměrné opotřebování materiálů nebo stárnutí polovodičů. Ovšem i u těch nejzákladnějších konfigurací světlometu, tedy s halogenovou žárovkou, si zákazník vyžaduje výsledky tepelných testů. Proto je zapotřebí znalostí tepelného managementu, odvodu tepla, materiálových vlastností a v neposlední řadě také tepelných simulací.

Hlavním předmětem zájmu této práce je emisivita a její vliv na odvod tepla od výkonového zdroje.

1 Základy teplotního managementu

Každý elektronický systém, který spotřebovává energii, je ovlivňován teplem vznikajícím při přeměně elektrické energie na tepelnou. Vznik tohoto tepla je nežádoucí, jelikož ovlivňuje parametry celého systému (změny parametrů prvků, termomechanické namáhání apod.). Proto se teplo musí minimalizovat a odvádět. Mezi hlavní zdroje tepla v obvodu patří především pasivní a aktivní součástky.

Přenos tepla prostředím je realizován pomocí částic, nosičů energie, které se v daném prostředí vyskytují, nebo se do daného prostředí dostanou z okolí. Z toho důvodu se teplo šíří různými způsoby v závislosti na skupenství látky a na vlastnostech prostoru, ve kterém dochází k jeho šíření. Může se jednat o elementární částice (elektrony, atomy), ale i o elektromagnetické záření, které přenáší energii pomocí fotonů.

K ochlazení systému dochází přirozeným nebo nuceným odvodem tepla. Přirozený odvod nastává v důsledku uplatnění principů přenosu tepelné energie. Základními principy šíření tepla jsou vedení (kondukce), proudění (konvekce), záření (radiace). Odvod tepla může být podpořen pasivními chladiči, nebo metodou nuceného chlazení.

1.1 Přenos tepla vedením

Přenos tepla vedením (kondukcí) nastává v plynném, kapalném i pevném prostředí. Podmínkou je existence spojitého látkového prostředí, ve vakuu kondukce tepla neprobíhá. Tento princip přenosu tepla je dominantní u pevných látek, u kapalin a plynů není příliš výrazný. Přenos tepla vedením v pevných látkách je zprostředkován volnými elektrony nebo přenosem kmitů krystalové mříže (důsledek tepelného pohybu částic). Tento princip umožňuje nejintenzivnější přenos tepelné energie.

Pro výpočet kondukce si musíme definovat několik důležitých veličin. Přenos tepla kondukcí je definován Fourierovým zákonem. Ten říká, že hustota tepelného toku q , množství přenesené tepelné energie za jednotku času na m^2 , je rovna teplotnímu gradientu a součiniteli tepelné vodivosti, jenž směřuje proti teplotnímu spádu [11]:

$$q = -\lambda \cdot \text{grad } T \quad (1)$$

kde q je hustota tepelného toku [$W \cdot m^{-2}$],

λ je tepelná vodivost [$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$],

grad T vyjadřuje změnu teploty ve směru šíření.

1.1.1 Vedení tepla rovinnou stěnou

Úpravou Fourierova zákona pro jednorozměrný případ a zanedbáním tepelné kapacity dostaneme velikost tepelného toku prošlého plochou S [9]:

$$\Phi = \lambda \cdot S \cdot \frac{\Delta T}{d} \quad (2)$$

kde Φ je tepelný tok prošlý plochou S [W],

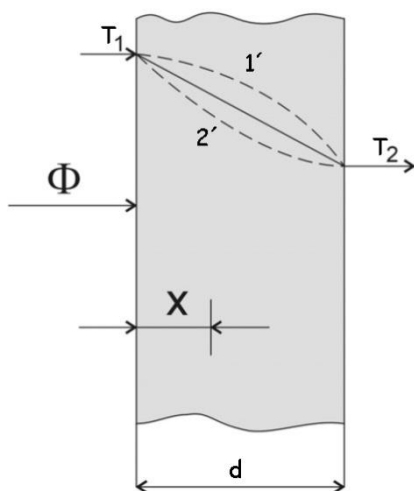
S je plocha kolmá k tepelnému toku [m^2],

ΔT je rozdíl teplot [$^{\circ}\text{C}$ nebo K],

d je vzdálenost míst s rozdílnou teplotou [m].

Teplota T se v ideálním případě zmenšuje lineárně se vzdáleností x z hodnoty T_1 na levém okraji na teplotu T_2 na pravém okraji podle rovnice (3) [9]. Na obrázku 1 je čárkovanou čarou 1' zobrazen skutečný průběh teploty pro keramické materiály a čárkovanou čarou 2' skutečný průběh pro čisté kovy [9].

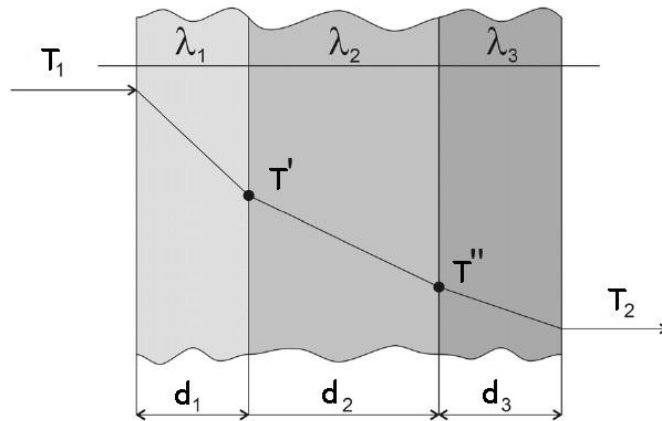
$$T = \frac{T_1 - T_2}{d} \cdot x + T_1 \quad (3)$$



Obrázek 1 - Vedení tepla jednoduchou rovinnou stěnou [9]

Je-li stěna složena z několika různě silných vrstev materiálů s rozdílnou tepelnou vodivostí (obr. 2), pak tepelný tok touto konstrukcí je [9]:

$$\Phi = \frac{S \cdot (T_1 - T_2)}{\frac{d_1}{\lambda_1} + \frac{d_2}{\lambda_2} + \dots + \frac{d_n}{\lambda_n}} \quad (4)$$



Obrázek 2 - Vedení tepla složenou rovinnou stěnou [9]

U složené rovinné stěny pro teploty na rozhraní vrstev platí tyto vztahy [9]:

$$T' = T_1 - \frac{\Phi \cdot d_1}{\lambda_1 \cdot S} \quad (5)$$

$$T'' = T_2 + \frac{\Phi \cdot d_2}{\lambda_2 \cdot S} \quad (6)$$

1.1.2 Vedení tepla válcovou stěnou

Při vedení tepla z vnitřního povrchu válcové trubky k vnějšímu povrchu (obr. 3) se při vzrůstajícím průměru trubky zvětšuje také plocha, kterou teplo odchází do okolí. Průběh teplot v závislosti na poloměru má proto tvar logaritmické křivky. Pro tepelný tok pak platí vztah [9]:

$$\Phi = \frac{2 \cdot \pi \cdot d}{\frac{1}{\lambda} \cdot \ln \frac{r_2}{r_1}} \cdot (T_1 - T_2) \quad (7)$$

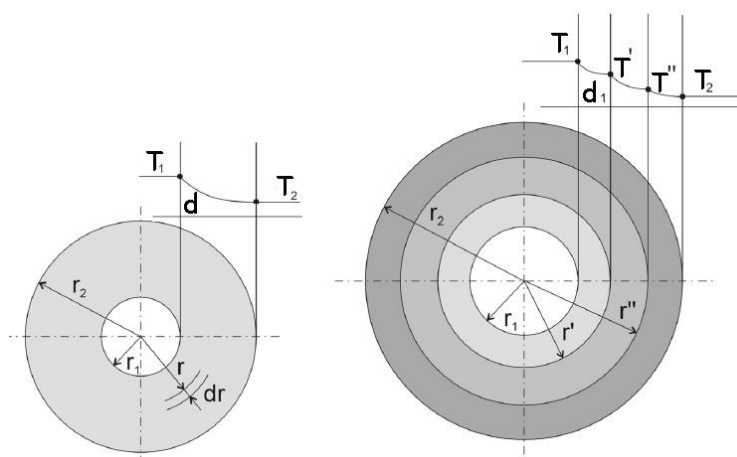
Obdobně platí vztah pro složenou válcovou stěnu [9]:

$$\Phi = \frac{2 \cdot \pi \cdot d \cdot (T_1 - T_2)}{\frac{1}{\lambda_1} \cdot \ln \frac{r_2}{r_1} + \frac{1}{\lambda_2} \cdot \ln \frac{r_3}{r_2} + \dots + \frac{1}{\lambda_n} \cdot \ln \frac{r_{n+1}}{r_n}} \quad (8)$$

Teploty na rozhraní vrstev pak vypočteme podle [9]:

$$T' = T_1 - \frac{\Phi}{\pi \cdot d} \cdot \frac{1}{2\lambda_1} \cdot \ln \frac{2r'}{2r_1} \quad (9)$$

$$T'' = T_2 - \frac{\Phi}{\pi \cdot d} \cdot \frac{1}{2\lambda_3} \cdot \ln \frac{2r_2}{2r''} \quad (10)$$



Obrázek 3 - Vedení tepla jednoduchou a složenou válcovou stěnou [9]

1.2 Přenos tepla konvekcí

Přenos tepla prouděním nastává převážně v proudících kapalinách a plynech, popř. plazmatu. K proudění dochází, když si částice látky mění v prostoru svoji polohu a unášejí přitom svoji tepelnou energii s sebou.

Velikost odevzdaného tepla prouděním je dána teplotním rozdílem mezi povrchem (např. pouzdra) a kapalinou nebo plynem. Pro správné určení množství tohoto tepla je nutné stanovit součinitel přestupu tepla α [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$] [9].

Proudění může být přirozené nebo nucené. Nucené proudění tepla vznikne vnějšími silami (např. ventilátorem). Jeho výhodou je, že může nastat i proti teplotnímu gradientu a lze jím ochlazovat. U přirozeného proudění vznikne pohyb v důsledku různých teplot kapalin a plynů. Celý systém se snaží dostat do ustáleného stavu, kdy každý prvek v systému má stejnou teplotu, tudíž ohřáté médium stoupá proti směru gravitace a na jeho místo proudí chladnější médium. Rozdíl teplot mezi povrchem tělesa a okolním plynem je dán vztahem [11]:

$$\Delta T = \frac{\Phi}{\alpha \cdot S} \quad (11)$$

kde Φ je tepelný tok prošlý plochou S [W],

S je plocha kolmá k tepelnému toku [m^2],

ΔT je rozdíl teplot [$^{\circ}\text{C}$ nebo K],

α je součinitel přestupu tepla [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$].

Koeficient přestupu tepla není materiálovou konstantou. Závisí na tlaku, teplotě a rychlosti proudění tekutiny, na druhu proudění (laminární nebo turbulentní) a na fyzikálních vlastnostech kapaliny (hustotě, měrné tepelné kapacitě, tepelné vodivosti a viskozitě) a dále na tvaru, rozměrech a drsnosti obtékaného tělesa. Koeficient α je tedy mírou přestupu tepla na rozhraní prostředí, mezi kterými dochází k výměně tepla. Pro představu jsou v tabulce 2 uvedeny orientační hodnoty.

Tento koeficient lze určit z kritériálních rovnic vyplývajících z teorie podobnosti. Při volném proudění se vypočítá ze součinu Grashofova, Prandtlova, resp. Nusseltova čísla, podle vztahů (12), (13), (14) [18]:

$$Gr = \frac{g \cdot l^3 \cdot \beta \cdot \Delta T}{\nu^2} = \frac{g \cdot l^3 \cdot \beta \cdot \Delta T \cdot \rho^2}{\eta^2} \quad (12)$$

$$Pr = \frac{\nu}{a} = \frac{c_p \cdot \eta}{\lambda} \quad (13)$$

kde l je charakteristický rozměr [m],
 ν je kinematická viskozita [$m^2 \cdot s^{-1}$],
 η je dynamická viskozita [$Pa \cdot s$],
 c_p je měrná tepelná kapacita [$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$],
 ρ značí hustotu vzduchu [$kg \cdot m^{-3}$],
 g je gravitační zrychlení [$m \cdot s^{-2}$],
 β je koeficient objemové teplotní roztažnosti [K^{-1}],
 a značí teplotní vodivost [$m^2 \cdot s^{-1}$],
 λ označuje tepelnou vodivost [$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$],
 ΔT je rozdíl teplot chlazené stěny a média [$^{\circ}C$ nebo K].

Po vypočtení Grashofova a Prandtlova čísla se získají jejich součinem konstanty C a n , hodnoty těchto konstant jsou uvedeny v tabulce 1. Poté se dosadí do následujícího vzorce, tzv. Nusseltova kritéria [18]:

$$Nu = C \cdot (Gr \cdot Pr)^n \quad (14)$$

Tento vztah platí pro vertikální plochu. U horizontální plochy je nutné vztah (14) vynásobit koeficientem 1,3, je-li zdroj tepla umístěn na horní straně a spodní strana zajišťuje chlazení. Pokud je tomu naopak, použije se koeficient 0,7.

Tabulka 1 - Hodnoty koeficientů C a n v závislosti na součinu Gr·Pr [18]

Gr·Pr	C	n	chyba [%]
$<10^{-2}$	0,5	0	± 15
$1 \cdot 10^2 - 5 \cdot 10^2$	1,18	0,125	± 15
$5 \cdot 10^2 - 2 \cdot 10^7$	0,54	0,25	± 15
$2 \cdot 10^7 - 5 \cdot 10^{13}$	0,135	1/3	± 8

Koeficient přestupu tepla α se pak určí ze vztahu [18]:

$$Nu = \frac{\alpha \cdot l}{\lambda} \rightarrow \alpha = \frac{\lambda \cdot Nu}{l} \quad (15)$$

kde l je tloušťka materiálu [m],

λ značí tepelnou vodivost [$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$].

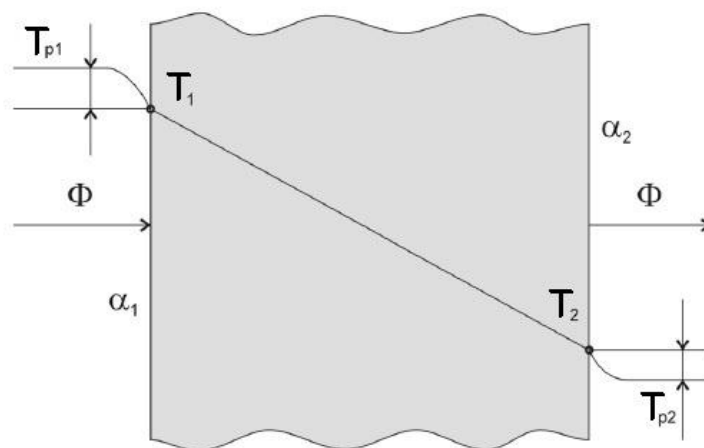
Tabulka 2 - Hodnoty součinitele přestupu tepla [18]

	α_{\min} [$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$]	α_{\max} [$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$]
klidný vzduch	12,5	125
proudící vzduch	40	2100
proudící kapalina	8400	21000
vroucí kapalina	16800	25100
kondenzující páry	29000	50000

Přenos tepla prouděním patří k nejobtížnějším výpočtovým problémům v tepelném managementu. Zabývá se jím mnoho odborné literatury. Při přestupu tepla prouděním platí Newtonův zákon [9]:

$$\Phi = \alpha_1 \cdot (T_{p1} - T_1) \cdot S \quad (16)$$

$$\Phi = \alpha_2 \cdot (T_2 - T_{p2}) \cdot S \quad (17)$$



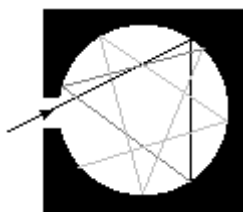
Obrázek 4 - Přenos tepla prouděním [9]

Mezi teplotou okolního prostředí a teplotou povrchu je i v ustáleném stavu teplotní rozdíl daný tím, že na povrchu stěny se vždy vyskytuje tenká vrstva plynu nebo kapaliny, která se neúčastní proudění. Touto vrstvou prochází tepelný tok pouze vedením, a protože tepelná vodivost plynů a kapalin je malá, nastává zde teplotní skok [9].

1.3 Přenos tepla radiací

Posledním způsobem přenosu je přenos tepla radiací (vyzařováním), které se na rozdíl od předchozích způsobů přenosu tepla děje pomocí elektromagnetických vln (jedná se o elektromagnetické záření stejně jako např. optické záření) v celém rozsahu vlnových délek. Tento princip nevyžaduje látkové prostředí, probíhá i ve vakuu, a řídí se mnohými fyzikálními zákony (např. Stefan-Boltzmannův zákon, Planckův zákon, Wienův zákon...) [9].

Vyzařování tepla různými tělesy je ovlivněno jejich schopnostmi záření vyzařovat, ale i pohlcovat a odrážet. Pro snadnější a přesnější popis byl zaveden fyzikální pojem - **absolutně černé těleso**. Absolutně černé těleso dokonale pohlcuje veškerou energii, která na těleso dopadá. Nepochází k žádnému odrazu záření, takže za nízké teploty se nám jeví toto těleso dokonale černé. V praxi se takovéto těleso realizuje jako dutina, jejíž vnitřní povrch tvoří matná černá plocha. Pronikne-li otvorem dovnitř elektromagnetické záření, při opakovaných odrazech od stěn dutiny se veškerá energie záření pohltí. Otvor dutiny se tedy pak jeví jako černé těleso [17].



Obrázek 5 - Otvor dutiny, který se jeví jako černé těleso [17]

Jak již bylo řečeno, tok energie, dopadající na těleso, lze rozdělit na tři části [9]:

- A – pohlcený tok (absorpce)
- B – odražený tok (reflexe)
- C – prostupující tok (prostupnost)

➤ a musí platit $A+B+C=1$

Běžná tělesa záření v infračervené oblasti prakticky nepropouštějí, pak platí: $A=1-B$

Potom lze definovat tyto extrémy:

- $A = 1$... absolutně černý povrch (veškerá energie je pohlcena)
- $B = 1$... absolutně bílý povrch (veškerá energie je odražena)
- $C = 1$... tepelně průzračné prostředí (H_2 , O_2 , N_2 ,...dvouatomové plyny)
- $C = 0$... tepelně neprůzračné prostředí (kovy)

1.3.1 Zákony sálání

Přenos tepla sáláním se řídí různými fyzikálními zákony:

Lambertův zákon

Podle tohoto zákona se nejvíce výkonově uplatňuje kolmá složka sálání dle [9]:

$$P = P_{\delta} \cdot \cos \delta \quad (18)$$

kde δ je úhel dopadu záření,

P_{δ} je energie [eV, J] ve směru úhlu δ .

Stefan-Boltzmannův zákon

Tento zákon popisuje intenzitu tepelného záření E [$W \cdot m^{-2}$] absolutně černého tělesa [9]:

$$E = \sigma \cdot T^4 \quad (19)$$

kde σ značí Stefan-Boltzmannovu konstantu [$5,67 \cdot 10^{-8} W \cdot m^{-2} \cdot K^{-4}$],

T je termodynamická teplota [K].

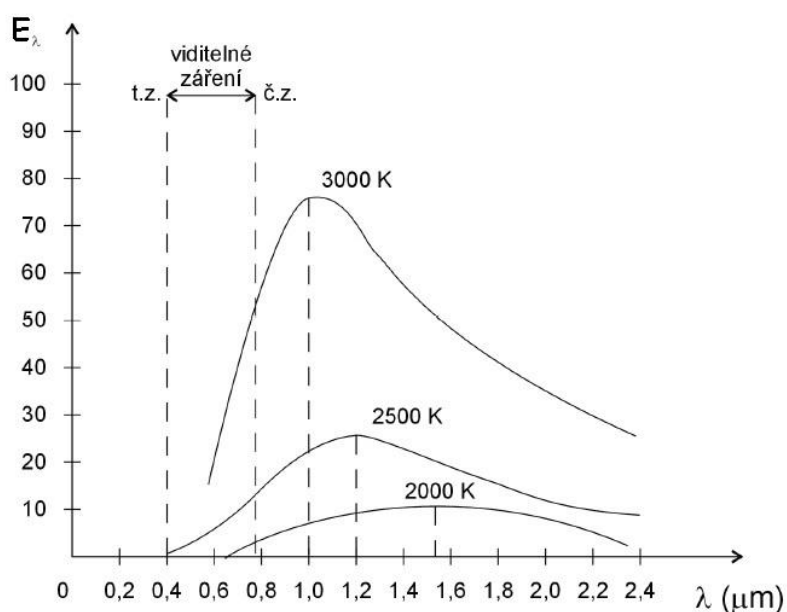
Zavedením veličiny emisivity ε [-], které se pak budu věnovat detailněji, do rovnice (19) dostaneme vzorec pro výpočet intenzity záření obecného povrchu [9]:

$$E = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4 \quad (20)$$

Podle tohoto zákona roste intenzita záření se čtvrtou mocninou teploty a mění se s hodnotou emisivity povrchu.

Wienův zákon

Wienův zákon, nebo také Wienův posouvací zákon říká, že spektrální intenzita záření E_λ [$\text{W} \cdot \text{m}^{-3}$] je při dané teplotě nejintenzivnější pro vlnovou délku λ_m , která je nepřímo úměrná této teplotě T . Z toho plyne, že při nízké teplotě těleso vyzařuje svým povrchem pouze dlouhovlnné (infrachervené) záření a s rostoucí teplotou tedy stoupá zářivost tělesa a maximum vyzařovaného spektra se E_λ posouvá ke kratším vlnovým délkám (viz. obrázek 6) [9].



Obrázek 6 - Wienův posouvací zákon [9]

Hodnota λ_m se výpočítá ze vzorce [9]:

$$\lambda_{\max} = \frac{2892}{T} \quad (21)$$

Zákon Kirchhoffův

Podle Kirchhoffova zákona platí, že poměr úhrnné zářivosti a relativní pohltivosti obecného tělesa je závislý pouze na absolutní teplotě tělesa T a nezávisí na barvě povrchu [9].

Planckův zákon

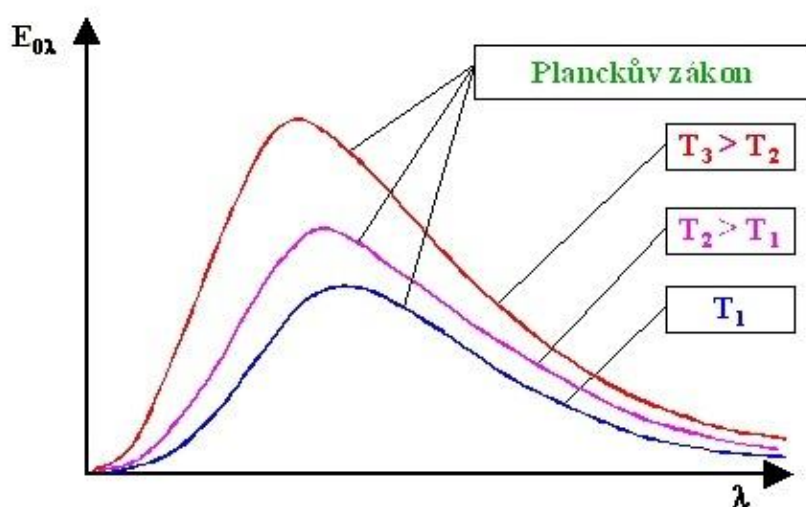
Planckův zákon, na základě kvantové teorie, říká, že záření o frekvenci f může být vyzařováno, nebo pohlcováno jen po kvantech energie o velikosti:

$$e = h \cdot f \quad (22)$$

kde h značí Planckovu konstantu [$6,6256 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$],

e je energie [J, eV].

Na obrázku 7 je grafické vyjádření Planckova vyzařovacího zákona pro různé teploty zdroje záření. Jedná se o závislost spektrální intenzity zářivého toku dokonale černého tělesa $E_{0\lambda}$ na vlnové délce záření.



Obrázek 7 - $E_{0\lambda}$ dokonale černého tělesa v závislosti na λ a teplotě zdroje záření [16]

Z tohoto grafu vyplývá, že se zvětšující se teplotou zdroje se zvětšuje spektrální intenzita zářivého toku dokonale černého tělesa a maximální hodnota spektrální intenzity zářivého toku se posouvá ke kratším vlnovým délkám.

2 Emisivita

Problematika emisivity a jejího vlivu na odvod tepla je stěžejním tématem pro tuto práci. Cílem praktické části je najít a ověřit vhodný způsob jejího určení pro různé materiály a povrchové úpravy.

Emisivita je relativní schopnost materiálu vyzařovat elektromagnetické záření odpovídající jeho teplotě, jde o bezrozměrné číslo od nuly do jedné. Z fyzikálního hlediska jde o podíl intenzity vyzařování tepelného zdroje E a intenzity vyzařování absolutně černého tělesa E_0 o stejné teplotě, směrových a spektrálních podmínkách [11]:

$$\varepsilon = \frac{E}{E_0} \quad (23)$$

Velikost emisivity závisí na těchto faktorech [3]:

- a) struktury povrchu
- b) teplotě tělesa
- c) vlnové délce
- d) směrových podmínkách

U běžných těles s tmavým povrchem je emisivita zhruba 0,9. Výjimku tvoří čisté kovové povrchy, u nichž je emisivita běžně desetkrát menší, tedy kolem 0,1 [19].

2.1 Závislost emisivity na struktuře povrchu

Jelikož je tepelné záření, zářením elektromagnetickým, tak lze tvrdit, že pro něj platí obdobné fyzikální principy jako pro záření světelné, u něhož struktura povrchu ovlivňuje pohlcování a odrazení světelného záření. Skutečnou emisivitu povrchu tedy může ovlivnit celá řada skutečností (např. jakým způsobem byl kov obráběn – např. broušením, frézováním, leštěním apod., jak je odolný vůči povrchové korozi, jaká je jeho konečná povrchová úprava, atd.)[3].

2.2 Závislost emisivity na teplotě tělesa

Všechna tělesa o teplotě vyšší než 0 K vyzařují elektromagnetické záření do svého okolí. Čím je teplota tělesa vyšší, tím více energie za určitou dobu vyzáří a spektrální maximum vyzařování se současně posouvá ke kratším vlnovým délkám, např. člověk o teplotě 310 K má vyzařovací spektrální maximum kolem 10 μm .

Obecně tedy platí, že závislost emisivity na teplotě je odvislá od vlnové délky, pro kterou emisivitu sledujeme. S růstem teploty přibývá zejména vyzařování krátkých vlnových délek (viz. Planckův zákon) [3].

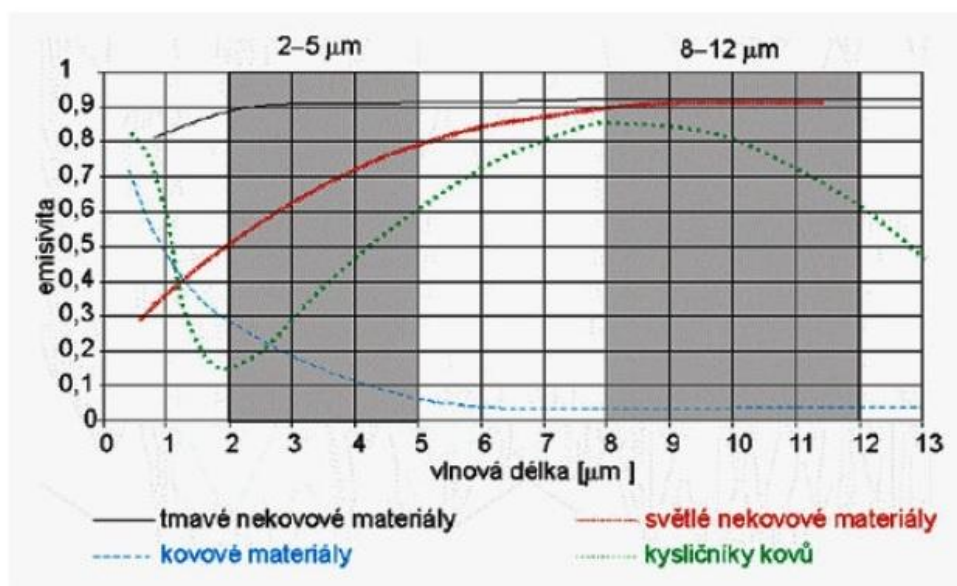
2.3 Závislost emisivity na vlnové délce

Při určité teplotě T vyzařuje absolutně černé těleso do okolí elektromagnetické vlnění různých vlnových délek. Tato vlnění nemají stejnou intenzitu záření. Na obr. 7 je znázorněn graf, na němž je vidět právě různé intenzity elektromagnetického záření v závislosti na vlnové délce. Spektrální hustota intenzity vyzařování E_λ určuje, jaká část celkové energie vyzařené zdrojem přísluší záření o vlnové délce při teplotě zdroje T [17].

Z hlediska závislosti emisivity materiálů na vlnové délce můžeme rozdělit vyzařující povrchy na povrchy [3]:

- a) dokonale šedé
- b) reálné šedé
- c) a selektivní

U dokonale šedých povrchů je emisivita nezávislá na vlnové délce vysílaného záření. Naopak u povrchů selektivních je emisivita funkcí vlnové délky záření. Reálný případ dokonale šedého povrchu neexistuje, protože všechny povrchy se ve skutečnosti chovají jako selektivní, nicméně určité povrchy se svým chováním, v určitém rozsahu vlnových délek, výrazně přibližují chování dokonale šedého tělesa a proto je označujeme jako reálné šedé [3].

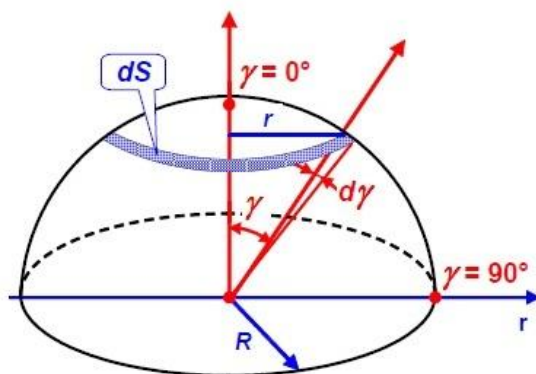


Obrázek 8 - Závislost emisivity na vlnové délce [3]

2.4 Závislost emisivity na směrových podmínkách

Posledním faktorem, který ovlivňuje emisivitu, je směr vyzařování. Z již vzniklých studií vyplývá, že při různých úhlech snímání povrchu, lze naměřit různé hodnoty emisivity. S růstem úhlu snímání, od kolmice k danému povrchu, roste zpravidla odrazivost povrchu a emisivita se snižuje.

Se změnou emisivity v závislosti na úhlu snímání souvisí pojem **střední poloprostorová emisivita** ε_{Ω} . Je to hodnota emisivity, která není vztažena k jednomu konkrétnímu úhlu, ale k poloprostoru (polokouli), jak je zobrazeno na obrázku 9 [3].



Obrázek 9 - Poloprostor [3]

Vztah pro výpočet poloprostorové emisivity vychází ze směrové emisivity ε a úhlu vyzařování γ dle [3]:

$$\varepsilon_{\Omega} = \int_{\gamma=0}^{\gamma=\pi/2} \varepsilon(\gamma) \cdot \sin(\gamma) \cdot d\gamma \quad (24)$$

3 Způsoby určování emisivity

3.1 Určení emisivity z tabulek

Využití tabulek je nejjednodušší a nejrychlejší způsob, jak zjistit hodnotu emisivity daného povrchu. Stačí si vyhledat tabulku (např. na internetu) a odečíst z ní vhodnou hodnotu. Nebo sami výrobci termokamer předinstalovávají takovéto tabulky do svých produktů, a tím myslím samotné termokamery, nebo software, který je dodáváný společně s nimi [3].

Na druhou stranu emisivita není konstanta, takže jde o nejméně přesný způsob stanovení, jelikož tabulkové hodnoty nejsou vztaženy k určité teplotě tělesa nebo vlnové délce atd. Navíc v případě kovových materiálů je závislost emisivity silně závislá na úpravě povrchu a tak by bylo nutné pro přesné určení emisivity znát drsnost povrchu materiálu a mít pro příslušnou drsnost tabulkovou hodnotu [3].

Tabulka 3 - Příklad tabulkových hodnot emisivit [8]

materiál	ϑ [°C]	ε [-]	materiál	ϑ [°C]	ε [-]
Hliník			Lak		
Nezoxidovaný	25	0,02	Černý	93	0,96
Nezoxidovaný	100	0,03	Modrý na hliníkové fólii	38	0,78
Nezoxidovaný	500	0,06	Čirý na hliníkové fólii, (2 nátěry)	93	,08 (.09)
Zoxidovaný	199	0,11	Čirý na lesklé mědi	93	0,66
Zoxidovaný	599	0,19	Čirý na matné mědi	93	0,64
Zoxidovaný při 599 °C	199	0,11	Červený na hliníkové fólii, (2 nátěry)	38	,61 (.74)
Zoxidovaný při 599 °C	599	0,19	Bílý	93	0,95
Silně zoxidovaný	93	0,2	Bílý na hliníkové fólii, (2 nátěry)	38	,69 (.88)
Silně zoxidovaný	504	0,31	Žlutý na hliníkové fólii (2 nátěry)	38	,57 (.79)
Vysoký lesk	100	0,09	Led		
Hrubě leštěný	100	0,18	Hladký	0	0,97
Fólie	100	0,09	Drsný	0	0,98
Vysoce leštěný plát	227	0,04	Lněný olej		
Vysoce leštěný plát	577	0,06	Na hliníkové fólii, nenatřeno	121	0,09
Lesklý svinutý plech	170	0,04	Na hliníkové fólii, 1 nátěr	121	0,56
Lesklý svinutý plech	500	0,05	Na hliníkové fólii, 2 nátěry	121	0,51
Slitina A3003, zoxidované	316	0,4	Na leštěném železe, film 0,025 mm	38	0,22
Slitina A3003, zoxidované	482	0,4	Na leštěném železe, film 0,050 mm	38	0,45
Slitina 1100-0	93 - 427	0,05	Na leštěném železe, film 0,102 mm	38	0,65
Slitina 24ST	24	0,09	Na leštěném železe, hustá vrstva	38	0,83
Slitina 24ST, leštěná	24	0,09	Lupek	20	0,69
Slitina 75ST	24	0,11	Mramor		
Slitina 75ST, leštěná	24	0,08	Bílý	38	0,95
Hořčík	38-260	,07-, 13	Hladký, bílý	38	0,56
Oxid hořečnatý	1027-1727	,16-, 20	Leštěný, šedý	38	0,75
Chrom	38	0,08	Nátěry		
			Modrý, Cu2O3	24	0,94
			Černý, CuO	24	0,96
			Zelený, Cu2O3	24	0,92
			Červený, Fe2O3	24	0,91
			Bílý, Al2O3	24	0,94
			Bílý, Y2O3	24	0,9

Metoda odečítání hodnot emisivity z tabulek je tak vhodná pro provozní či zkušební měření, nikoliv však pro přesné laboratorní měření.

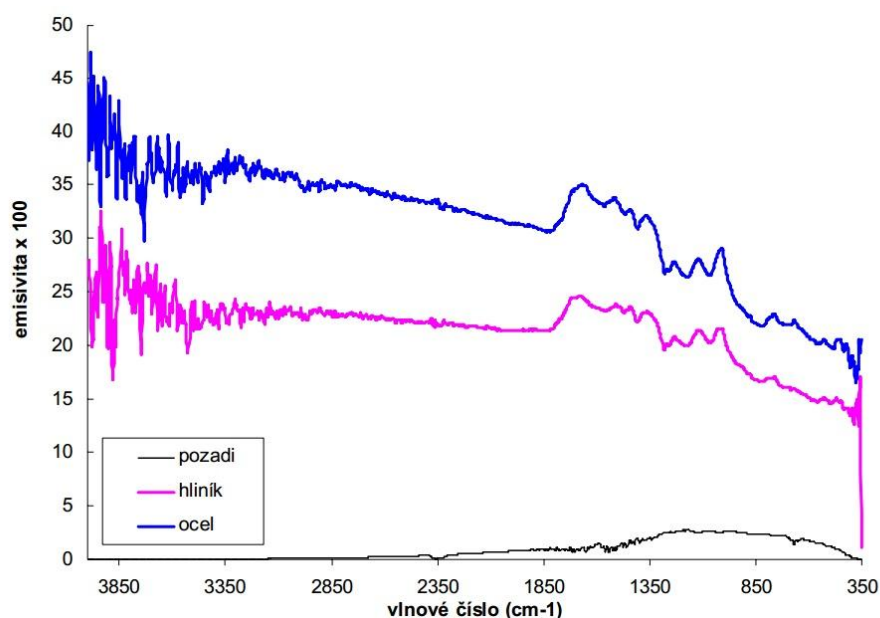
3.2 Určení emisivity spektrometrem

Měření emisivity spektrometrem se nazývá emisní spektrometrie. Je to technika používaná k určování emisivity materiálů v závislosti na vlnové délce. K měření se používá upravený infračervený spektrometr, který musí být vybaven externím portem a možností vyjmutí vnitřního zrcadla odrážejícího záření vydávané zdrojem k interferometru. Zkoumaný materiál nahrazuje vnitřní radiační zdroj záření a je umístěn mimo vzorkový prostor spektrometru. Výsledné emisní spektrum je dáno vztahem [10]:

$$\varepsilon = \frac{I_r}{I_\varepsilon} \quad (25)$$

kde I_r je intenzita vyzařování reálného tělesa,
 I_ε je intenzita vyzařování černého tělesa.

Výsledek emisní spektroskopie je zobrazen na obrázku 10.



Obrázek 10 - Spektrální závislost emisivity hliníku a oceli při teplotě 200 °C [10]

3.3 Výpočtové metody

Tato metoda využívá k měření kombinaci termočlánků/termokamera. Nejdříve změříme hodnotu teploty povrchu vzorku termočlánkem a současně vytvoříme termogram (grafický otisk tepelné stopy vzorku) z termovizní kamery, která má nastavenou emisivitu $\varepsilon = 1$. Z termogramu se následně užitím příslušného PC softwaru odečte hodnota teploty v blízkosti termočlánku. Tím získáme druhý tepelný údaj. První je skutečná teplota, kterou jsme získali pomocí termočlánku a druhá je fiktivní teplota při emisivitě povrchu rovné jedné. Tyto 2 teploty pro samotný výpočet nestačí, je nutné znát i radiační teplotu okolí vzorku. Tu lze snadno změřit pomocí měření teploty okolních stěn pyrometrem [3].

Pro výpočet hledané emisivity pak platí [3]:

$$\varepsilon = \frac{T_T^n - T_R^n}{T_W^n - T_R^n} \quad (26)$$

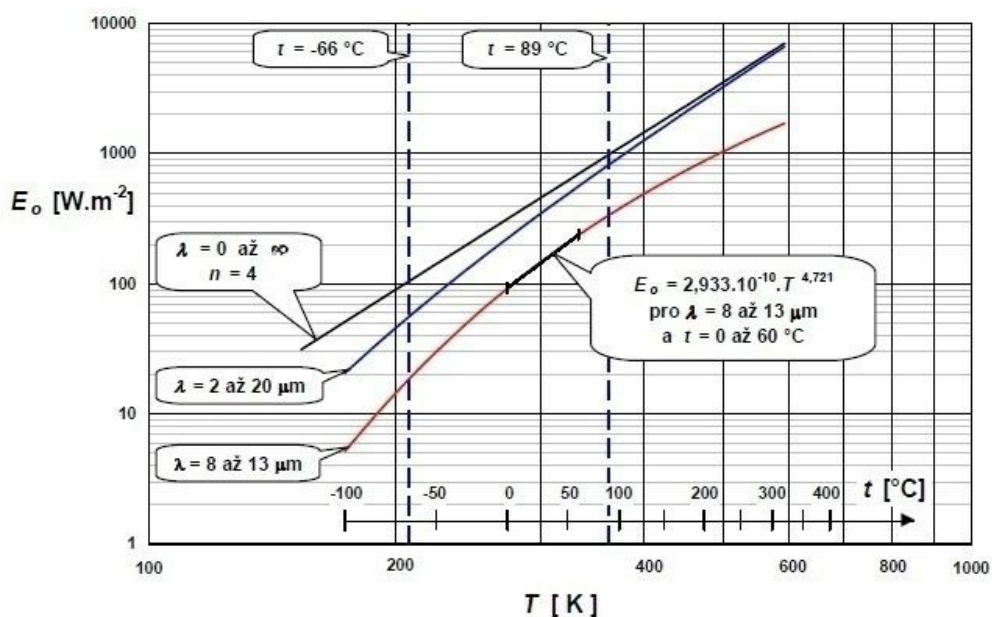
kde T_T [K] je teplota povrchu naměřená termokamerou,

T_R [K] je radiační teplota okolí,

T_W [K] je teplota naměřená termočlánkem,

a exponent n [-] vyjadřuje závislost hustoty tepelného toku na teplotě.

Na obrázku 11 je zobrazeno, jak ovlivňuje exponent n závislost hustoty zářivého toku černých těles E_0 na teplotě T .



Obrázek 11 - Závislost hustoty zářivého toku černých těles E_0 na teplotě T [3]

Na obrázku jsou vyznačeny 3 křivky. Černá vyjadřuje závislost pro celé spektrum vyzařovaných vlnových délek s konstantním exponentem $n = 4$, což je obecně užívaná hodnota exponentu dle Stefan-Boltzmanova zákona, jímž je přímka vyjádřením. Tato přímka je získána integrací Planckova vyzařovacího zákona v mezích vlnových délek λ (0 až ∞ μm). Modrá křivka pak ukazuje integraci Planckova vyzařovacího zákona v rozmezí vlnových délek λ (2 až 20 μm), ve kterém se závislost E_0 na T částečně blíží Stefan-Boltzmanovu zákonu [3].

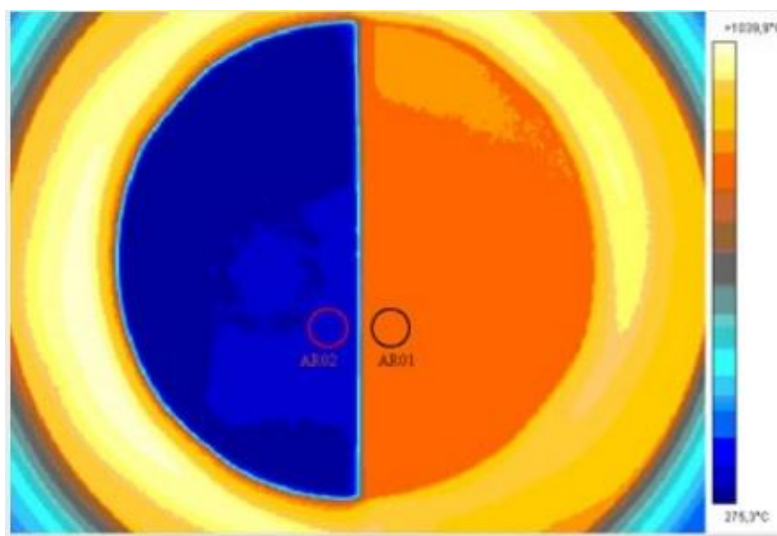
3.4 Bezvýpočtové metody

U těchto metod se využívá schopnosti uživatelského nastavení hodnoty emisivity přímo v uživatelském rozhraní měřicího přístroje. Používají se buď termokamery, nebo pyrometry. Hodnoty emisivity z těchto měření jsou relativně přesné a lze je získat poměrně rychle, protože hodnotu výsledné emisivity lze odečíst přímo z přístroje a není nutný žádný výpočet. Přesnost všech termovizních a pyrometrických měření se zvyšuje se zvyšujícím se rozdílem mezi teplotou okolí a radiační teplotou vzorku [3].

3.4.1 Využitím referenční emisivity

Principem této metody je opatření části zkoumaného vzorku povlakem (nátěrem, lepící páskou) o známé emisivitě. Tohoto principu se dá využít při relativně nízkých teplotách (do 250 °C). Na termovizní kameře nebo pyrometru se nastaví známá emisivita povlaku, provede se bodové tepelné měření v oblasti potažené povlakem a odečte se daná teplota. Následně se vybere bod v oblasti o neznámé emisivitě. V tomto bodě se provede opět tepelné měření s tím rozdílem, že na zařízení měníme hodnotu emisivity do doby, než teplota povrchu o neznámé emisivitě je stejná, jako teplota povrchu o známé emisivitě [7].

Hodnota emisivity, při níž se teploty obou oblastí rovnají, je naše hledaná emisivita. Nicméně aby tento princip fungoval, je vhodné body pro toto měření volit blízko sebe, jak je naznačeno na obrázku 12, a teplota měřeného objektu nesmí být příliš blízká teplotě okolního prostředí [7].



Obrázek 12 - Výběr bodů při použití materiálu s referenční emisivitou [7]

Pravá část vzorku je pokryta vrstvou o známé emisivitě, levá část vzorku představuje povrch s neznámou hodnotou emisivity.

V současné době jsou na trh dodávány pyrometry, které jsou navíc vybaveny dotykovou sondou. Takový pyrometr dokáže podle indikované povrchové teploty dotykového čidla automaticky přednastavit hodnotu emisivity snímaného tělesa.

3.4.2 Použitím termoelektrického článku

Tento princip měření využívá ke stanovení emisivity povrchu termoelektrického jevu. Opět se na měřeném povrchu určí měřicí bod, na tento bod se vhodným způsobem umístí termočlánek, kterým se snímá teplota vzorku. Znovu je důležité, aby teplota vzorku byla co nejodlišnější od teploty okolí. Následně si zvolíme na vzorku oblast, která leží co nejbližšie termočlátku, do této oblasti však nesmí přímo zasahovat samotný termočlánek. Poté na kameře či pyrometru měníme hodnotu emisivity tak dlouho, dokud není teplota termočlátku a teplota, kterou udává kamera, pro zvolenou oblast shodná. Odečtená hodnota emisivity z kamery je hledaná emisivita povrchu [3].

Výhodou je, že není nutné pořizovat speciální povlaky o známé emisivitě, a odpadá operace nanášení těchto povlaků. Naopak nevýhodou je nutnost dalšího měřicího vybavení. Zároveň se může vyskytnout problém se spolehlivým upevněním termočlátku na vzorek, kdy konec termočlátku musí být ve stálém kontaktu s povrchem vzorku. K tomu se může využít např. lepidla, které ovšem svojí tepelnou vodivostí může negativně ovlivnit výsledek měření [3].

3.4.3 Vytvoření otvoru ve vzorku

Princip této metody je obdobný jako u použití referenčního materiálu. Vytvořením otvoru ve vzorku totiž dostaneme povrch o známé emisivitě viz. kapitola 1.3. Do vzorku se vyvrtá otvor, jehož délka bude asi šestkrát větší než jeho průměr. Tím se v podstatě vytvoří uvnitř otvoru absolutně černé těleso a dno otvoru představuje povrch, který má emisivitu rovnu jedné [3].

Poté už se postupuje obdobně jako u metody s použitím referenčního materiálu. Naměřená teplota na dně otvoru odpovídá skutečné teplotě v tomto bodě, při nastavení $\varepsilon = 1$ na měřicím zařízení. Následně se zvolí měřicí bod na povrchu materiálu, mimo otvor, a snižuje se hodnota emisivity na měřicím zařízení, dokud nedojde ke shodě obou teplot. Tedy teploty na dně otvoru a teploty ve zvoleném bodě mimo otvor. Tato metoda je vhodná především pro materiály s vysokou tepelnou vodivostí, jelikož je požadované, aby teploty na povrchu vzorku a uvnitř otvoru byly co nejvíce shodné. Nevýhodou je, že je to destruktivní typ analýzy, dojde ke znehodnocení vzorku [3].

4 Experimentální část

Cílem experimentální části práce bylo zjištění hodnot emisivit a chování emisivních vlastností čtyř duralových vzorků s různou povrchovou úpravou a využít zjištěné hodnoty jako výchozí podmínky pro tepelnou simulaci v programu ANSYS Icepak. K měření emisivit byla zvolena experimentální metoda s použitím termočlánků a termokamery. Tato metoda je popsána v kapitole 3.4.2. Součástí experimentu bylo i spektroskopické měření světelných výstupů LED čipů, z důvodu ověření LED binu, a měření drsnosti povrchu jednotlivých povrchových úprav.

Emisivita byla měřena pro tři odlišné teploty povrchu vzorku: $\vartheta_1 = 50\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\vartheta_2 = 75\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\vartheta_3 = 100\text{ }^{\circ}\text{C}$ a tři proudová zatížení $I_1 = 300\text{ mA}$, $I_2 = 600\text{ mA}$, $I_3 = 900\text{ mA}$. Při spektroskopickém měření se zaznamenával světelný výstup diody - ϕ [lm] při třech proudových zatíženích $I_1 = 400\text{ mA}$, $I_2 = 700\text{ mA}$, $I_3 = 1000\text{ mA}$.

Před samotným měřením byla provedena opakovaná kalibrační měření, jejichž účelem bylo seznámení s měřicí technikou a určení optimálního postupu pro experimenty.

Měření probíhalo na R&D oddělení firmy Automotive Lighting s.r.o. Jihlava, kde bylo k dispozici veškeré potřebné vybavení, včetně termokamery a spektrometru.

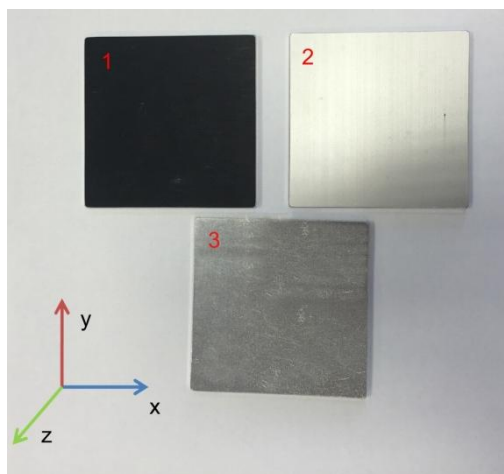
4.1 Praktické měření

4.1.1 Měřící vzorky

K praktickému měření byly zhotoveny čtyři duralové vzorky s různou povrchovou úpravou (obr. 13) a drsností. Zhotovené destičky měly rozměr 60x60x3 mm a povrchovou úpravu:

- černění
- kartáčování
- pískování
- leštění

Na obrázku jsou zobrazeny pouze tři vzorky, protože povrchová úprava kartáčováním a pískováním vypadají na první pohled stejně, byly by tedy k nerozeznání.



Obrázek 13 - Ukázka vzorků: 1) černěný, 2) pískovaný, 3) leštěný

Drsnost povrchu je jednou z možných vlastností, která ovlivňuje velikost emisivity. K měření drsnosti byl použit přístroj Mahr MarSurf PS1. Tento přístroj měří drsnost dotykovou metodou pomocí hrotu, přičemž profilové rozlišení je 8 nm [13]. Na daných vzorcích byla změřena drsnost povrchu v osách x a y, jak je patrné z obr. 13.



Obrázek 14 - Mahr MarSurf PS1 na měření drsnosti [13]

Každý vzorek byl změřen třikrát a naměřené hodnoty jsou uvedeny v tabulce 4. Zde je pozoruhodné, že pro černěný povrch je hodnota drsnosti měřená v ose x 4,57 μm , zatímco drsnost měřená v ose y pouze 1,135 μm . To svědčí o tom, že na hodnotu drsnosti má vliv nejen typ povrchové úpravy, ale také způsob jejího provedení. U zbylých vzorků byly drsnosti v obou osách téměř totožné.

Tabulka 4 - Drsnosti povrchů zkoumaných vzorků

vzorek	Ra _{1X} [μm]	Ra _{2X} [μm]	Ra _{3X} [μm]	Ra _X [μm]	Ra _{1Y} [μm]	Ra _{2Y} [μm]	Ra _{3Y} [μm]	Ra _Y [μm]
černěný	4,556	5,149	4,005	4,570	0,807	1,004	1,594	1,135
kartáčovaný	0,870	0,814	0,837	0,840	0,743	0,724	0,748	0,738
pískovaný	2,034	1,774	2,055	1,954	2,221	2,080	1,876	2,059
leštěný	0,259	0,360	0,367	0,329	0,202	0,351	0,375	0,309

Dalším krokem bylo umístění tepelného zdroje, který bude zahřívat zkoumaný materiál. Jako zdroj tepla byla zvolena 3-čipová OSRAM OSTAR LED U1A3 01 používaná v automobilovém průmyslu, která byla napájena stejnosměrným napětím. Samotný čip je umístěn na keramice a ta je pro lepší tepelný odvod přichycena na hliníkovou desku, tzv. izolovaný kovový substrát (IMS) o rozměru 2x2 cm. Detail použitého čipu je na obr. 15.



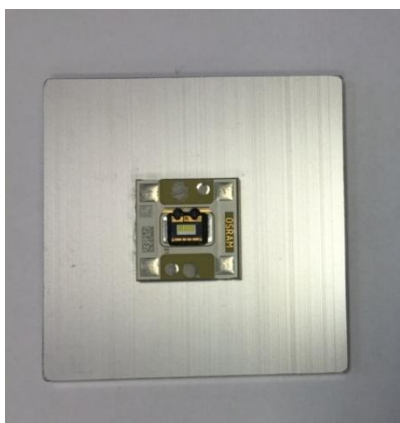
Obrázek 15 - OSRAM OSTAR LED čip [14]

Parametry LED diody jsou uvedeny v tabulce 5 [15].

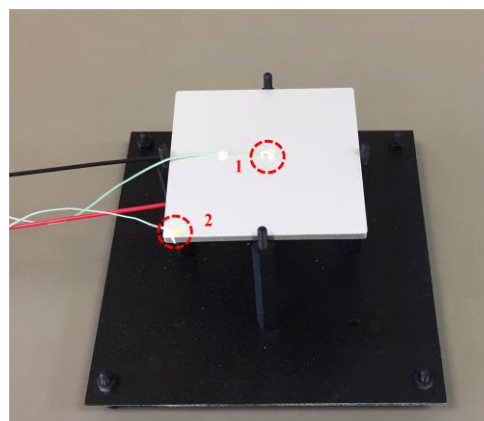
Tabulka 5 - Parametry LED OSRAM OSTAR U1A3 01 [15]

parametr	symbol	hodnota		jednotka	poznámky
provozní teplota	T_{op}	-40...135		°C	-
skladovací teplota	T_{stg}	-40...135		°C	-
teplota PN přechodu	T_j	150		°C	krátkodobě až 175 °C
proudové zatížení	I_F	100...1200		mA	-
napětové zatížení	V_F	min.	9.00	V	-
		typ.	10.00		
		max.	11.3		

Diody byly umístěny zhruba doprostřed vzorků na opačnou stranu, než byla měřená strana. K povrchu byly uchyceny teplovodivým lepidlem SILCOTHERM[®] s tepelnou vodivostí $\lambda = 2,3 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ [20]. Pohled na tento testovací vzorek je uveden na obr. 16.



Obrázek 16 - Umístění LED čipu na vzorek



Obrázek 17 - Umístění termočlánků

Pak byly připájeny napájecí kabely a přilepeny dva termočlánky. Jeden uprostřed vzorku a druhý v rohu, jak je patrné z obrázku 17. K lepení bylo použito dvousložkové rychle tuhnoucí lepidlo X60. Vzorek byl následně uchycen do tepelně izolačního plastového držáku, který by neměl zbytečně odvádět teplo ze vzorku a zatěžovat tak měření chybou. Důležitou věcí při lepení termočlánků bylo minimalizovat množství použitého lepidla. Plocha spoje společně s tepelnou kapacitou lepidla a termočlánku by mohly ovlivnit výsledky měření.

Celá sestava byla ještě před samotným měřením umístěna do kartonové krabice o rozměrech 400x310x335 mm, aby nedocházelo k ovlivňování naměřených hodnot proudícím vzduchem. Ve víku byl vytvořen otvor pro objektiv termokamery (obr. 18). Na vnitřní stěny krabice byla sprejem nanесena černá barva s definovanou emisivitou $\varepsilon = 0,96$, tím se simulovalo umístění vzorku v temné komoře a výsledek měření by neměl být ovlivněn radiací a odrazy okolních světelných zdrojů (zářivky v místnosti, sluneční záření apod.).

4.1.2 Popis měřicího prostoru

Měření probíhalo v běžných prostorách na pracovním stole s termokamerou a PC. Uspořádání měřicího prostoru včetně veškerého vybavení je znázorněno na obrázku 18. Na stole byla dále umístěna kartonová krabice se vzorkem, na který je namířena termokamera. Z krabice jsou vyvedeny termočlánky a napájecí kabely. Pro představu je na stole umístěn i spektrometr. Detailnější popis použitých měřicích přístrojů je uveden v následující kapitole.

Principem měření je zahřívání vzorku duralového chladiče LED čipem ze spodní strany definovanou hodnotou proudu. Na horní straně vzorku jsou umístěny termočlánky a rozložení teploty na jejím povrchu je snímáno termokamerou. Na termokameře se mění hodnota emisivity, dokud se obě zobrazované hodnoty teplot neshodují.



Obrázek 18 - Měřicí pracoviště

- termokamera FLIR SC640
- krabice se vzorkem
- datalogger ABLBORN ALMEMO 710 s napojenými termočlánky typu K
- zdroj AIM-TTI CPX400SP
- FEASA™ LED spektrometr
- PC + software

4.1.3 Popis měřících přístrojů

Termokamera

Pro měření byla použita termokamera pracující v infračerveném spektru FLIR SYSTEMS ThermoCAM SC640 (obr. 19). Během měření byla umístěna na polohovatelném stativu a na vzorek mířila pod mírným úhlem, aby nedocházelo k odrazům tepelných stop vzorku zpět do objektivu termokamery, což by mělo za následek zkreslení výsledků měření.



Obrázek 19 - Termokamera FLIR SC640 [6]

Parametry termokamery jsou uvedeny v tabulce 6.

Tabulka 6 - Parametry termokamery FLIR SC640 [6]

rozlišení	640 x 480 obrazových bodů
rozsah měřených teplot	– 40°C až +1500°C
přesností	± 2°C
a teplotní citlivostí	60 mK při 30°C
objektiv	24°/18°
minimální ostřicí vzdálenosti objektivu	30 cm
elektronický zoom	1–8x
možnost nahrávání videa	ano
spektrální rozsah	7,5–13 μm

Datalogger s termoelektrickými články

Pro zapisování teplot měřených termočlánky typu K byl použit datalogger AHLBORN ALMEMO 710 (obr. 20). K dataloggeru byly připojeny celkem 3 termočlánky. Dva snímající teplotu povrchu vzorku a třetí sloužil k měření teploty okolí uvnitř krabice.



Obrázek 20 - Datalogger ALMEMO 710 [4]

Parametry dataloggeru a termočlánku typu K jsou uvedeny v následující tabulce.

Tabulka 7 - Parametry dataloggeru a termočlánku [4]

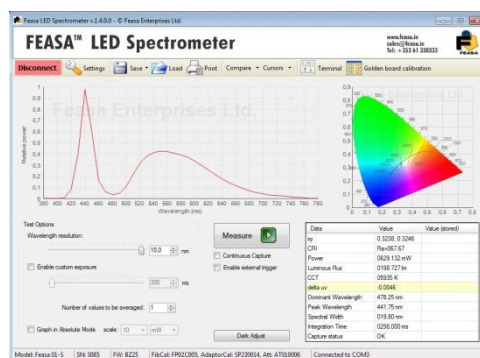
datalogger	
displej	TFT-LCD VGA 640x480, 5,7"
počet vstupů	10
A/D převodník	delta sigma 24 bitový
rychlost měření	100 měření/s
výstupní moduly	USB, ethernet, bluetooth
termočlánek typu K	
teplotní rozsah	-200°C až 1250°C
standardní přesnost	$\pm 2,2^{\circ}\text{C}$ (0,75%)
výběrová přesnost	$\pm 1,1^{\circ}\text{C}$ (0,4%)

Spektrometr

Pro spektroskopické měření byl použit FEASA™ LED spektrometr a vyhodnocovací software. Tento přístroj je navrhnut speciálně pro měření LED čipů na desce plošných spojů s omezeným přístupem [5]. Detail přístroje je na obrázku 21 a okno vyhodnocovacího softwaru na obrázku 22.



Obrázek 21 - Feasa™ LED spektrometr [5]



Obrázek 22 - FEASA™ software [5]

Parametry spektrometru jsou v tabulce 8.

Tabulka 8 - Parametry spektrometru [5]

rozsah vlnových délek	380nm - 780nm
přesnost	světelný tok: 10%
rozsah pracovních teplot	0 °C - +40 °C
integrační čas	2 ms – 100 s
automatická expozice	ano
automatická volba rozsahu	ano

Zdroj

Pro napájení LED diod byl použit stejnosměrný laboratorní jednokanálový napájecí zdroj AIM-TTI CPX400SP.



Obrázek 23 - Zdroj [12]

Parametry napájecího zdroje jsou uvedeny v tabulce 9.

Tabulka 9 - Parametry napájecího zdroje [12]

počet kanálů	1
výstupní napětí	0 až 60 V DC
výstupní proud	0 až 20 A
rozlišení výstupního napětí	10 mV
rozlišení výstupního proudu	10 mA
druh napájecího zdroje	spínaný

Okolní teplota a vlhkost

Další měřenou veličinou byla vlhkost vzduchu a teplota okolí. Tyto veličiny byly odečítány z automatické měřicí stanice CISCO SYSTEMS umístěné na zdi uvnitř místnosti.

4.1.4 Výsledky měření

Tepelné měření

Pro statistické vyhodnocení tepelného měření by mělo být použito většího počtu měřených vzorků, avšak v tomto případě byly vyrobeny z důvodu realizačních možností dva vzorky ke každé modifikaci povrchové úpravy. V rámci měření byl zhotoven měřicí protokol, jehož struktura je ukázána na obrázku 24, kde jsou uvedeny i definice k jednotlivým použitým zkratkám v měřicím protokolu.

vzorek	datum	vlhkost [%]	I [mA]	U [V]	TČ00 [°C]	TČ01 [°C]	TK00 [°C]	TK01 [°C]	ambient [°C]	emisivita	poznámky

pole	definice	jednotky
vzorek	název měřeného vzorku	-
datum	datum měření	-
vlhkost	vlhkost v místnosti	[%]
I	proud zdroje	[mA]
U	napětí zdroje	[V]
TČ00	teplota uprostřed - měřená termočlánkem	[°C]
TČ01	teplota v rohu - měřená termočlánkem	[°C]
TK00	teplota uprostřed měřená - termokamerou	[°C]
TK01	teplota v rohu - měřená termokamerou	[°C]
ambient	teplota uvnitř krabice - měřená termočlánkem	[°C]
emisivita	hodnota emisivita - odečtená z termokamery	[-]
poznámky	pole pro případné poznámky z měření	-

Obrázek 24 - Ukázka měřicího protokolu a význam použitých zkratk

Emisivita vzorku byla odečítána pro tři různá proudová zatížení a tři různé teploty povrchu vzorku (viz kapitola 4). Ukázka naměřených hodnot je uvedena v tabulce 10. Všechna naměřená a zpracovaná data, včetně grafů, jsou přiložena na CD.

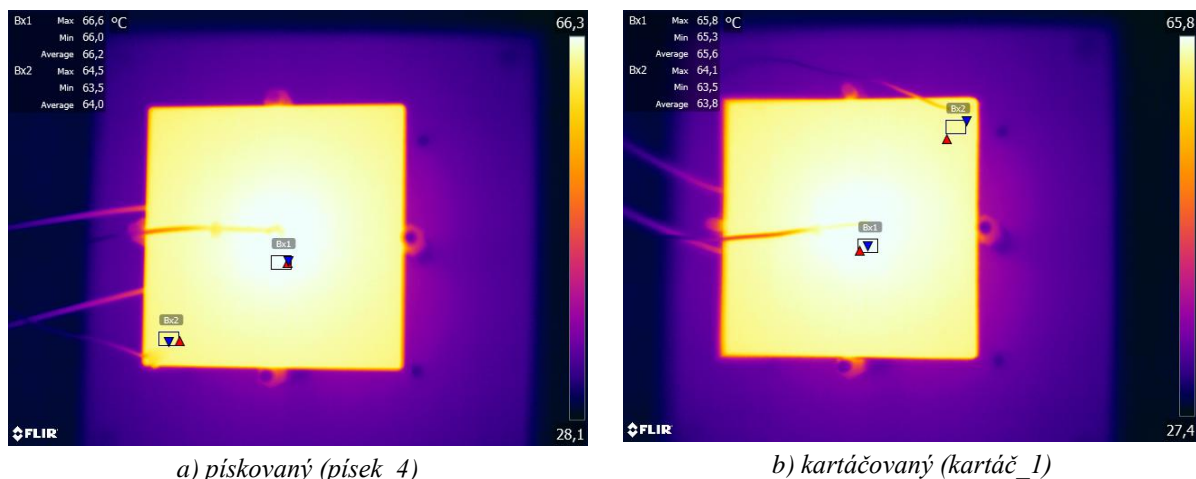
Samotný průběh měření vypadal následovně. Na zdroji byl nastaven požadovaný proudový výstup a čekalo se do ustálení teplot povrchu vzorku. Poté byly hodnoty teplot měřené termočlánky zapsány do tabulky, na PC se nastavila odpovídající hodnota emisivity a z pořízeného termogramu byly zapsány teploty povrchu naměřené termokamerou. Jako poslední byly zapsány klimatické údaje.

Tabulka 10 - Ukázka naměřených dat (vzorek: kartáč_1)

vzorek	datum	vlhkost [%]	I [mA]	U [V]	TČ00 [°C]	TČ01 [°C]	TK00 [°C]	TK01 [°C]	ambient [°C]	emisivita
kartáč_1	13.4.2016	39,1	300	8,60	45,8	45,4	-	-	25,7	0,97
			600	8,95	65,8	65,1	-	-	26,0	0,97
			900	9,25	85,2	84,1	-	-	27,6	0,96

Odečítání teplot z termogramu bylo prováděno v počítačovém programu FLIR Tools Software. Zapisovala se průměrná hodnota teploty vyhodnocovaná z obdélníkové oblasti.

Tyto oblasti, jak je patrné z obr. 25, byly umístěny v těsné blízkosti uchyceného termočlánku. Vyhodnocovací oblasti nesměly být umístěny přímo na termočlánku, poněvadž použité lepidlo má jiné vlastnosti než zkoumaný materiál, a mohlo by tak dojít ke zkreslení výsledků měření. Získaná data byla následně zpracována v programu Excel. Takto získané hodnoty jsou uvedeny v tabulce 11.



Obrázek 25 - Příklad termogramu při $I = 600 \text{ mA}$

Tabulka 11 - Výsledky měření emisivity

	I [mA]	TČ00 [°C]	TČ01 [°C]	TK00 [°C]	TK01 [°C]	emisivita [-]
černěný	300	45,6	44,7	45,6	44,7	0,98
	370	49,9	48,8	49,9	48,9	0,97
	600	64,1	62,7	64,0	62,2	0,96
	770	74,7	73,0	74,7	72,2	0,95
	900	83,4	80,8	83,3	80,3	0,95
	1160	100,2	96,8	100,2	96,3	0,94
kartáčovaný	300	46,0	45,3	46,1	45,3	0,98
	360	50,0	49,2	50,0	49,0	0,98
	600	65,7	64,3	65,7	63,8	0,97
	750	75,0	73,2	75,1	72,7	0,96
	900	84,9	82,5	84,8	81,9	0,96
	1130	100,1	97,0	100,2	96,3	0,96
pískovaný	300	45,7	44,7	45,7	45,0	0,97
	370	50,1	48,9	50,0	49,1	0,97
	600	65,5	63,8	65,5	63,7	0,96
	750	75,2	72,5	74,9	72,6	0,96
	900	85,5	82,2	85,4	82,5	0,95
	1110	99,9	95,4	99,9	96,1	0,95
leštěný	260	50,3	49,3	49,9	48,6	0,12
	300	53,6	52,4	53,7	50,2	0,12
	540	75,1	73,1	74,7	69,6	0,10
	600	81,0	78,7	81,4	75,4	0,10
	850	99,9	98,2	100,1	94,1	0,09
	900	104,1	102,1	103,8	98,6	0,09

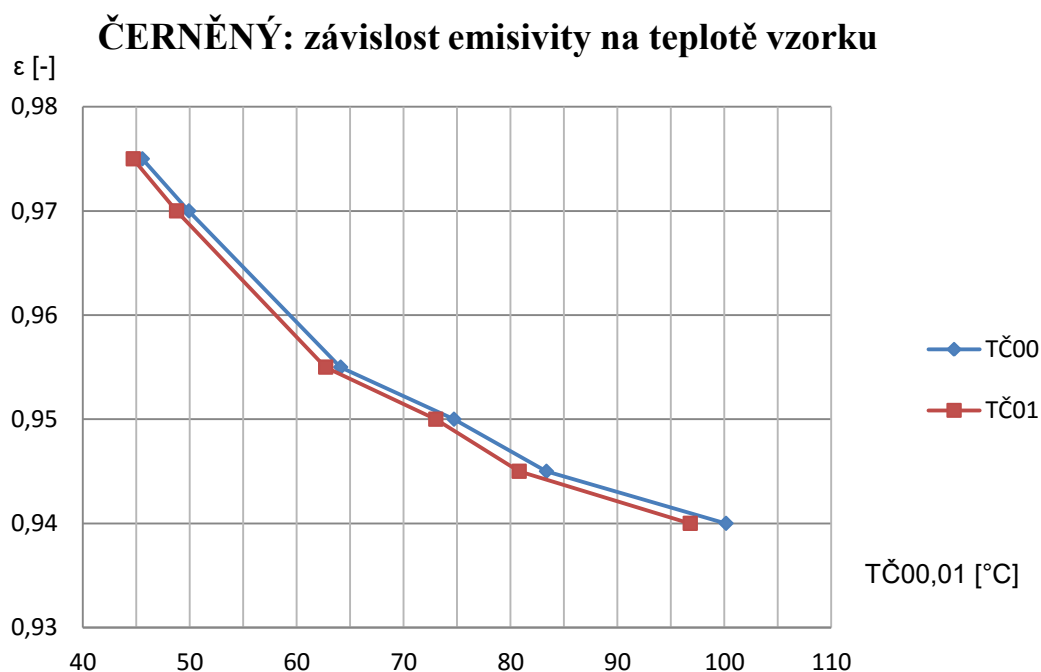
TČ00/01 - teplota měřená termočlánkem – uprostřed/v rohu vzorku

TK00/01 - teplota měřená termokamerou – uprostřed/v rohu vzorku

Hodnoty emisivity v tabulce 11 jsou zaokrouhleny na dvě desetinná místa. Z tabulky 11 vyplývá, že s rostoucím proudem, resp. teplotou, hodnota emisivity u všech měřených vzorků klesala. Dle očekávání měl nejnižší hodnotu emisivity leštěný vzorek, u něhož se pohybovala od 0,09 až po 0,12, což by odpovídalo tabulkovým hodnotám. Zbylé tři vzorky měly emisivitu od 0,94 po 0,98.

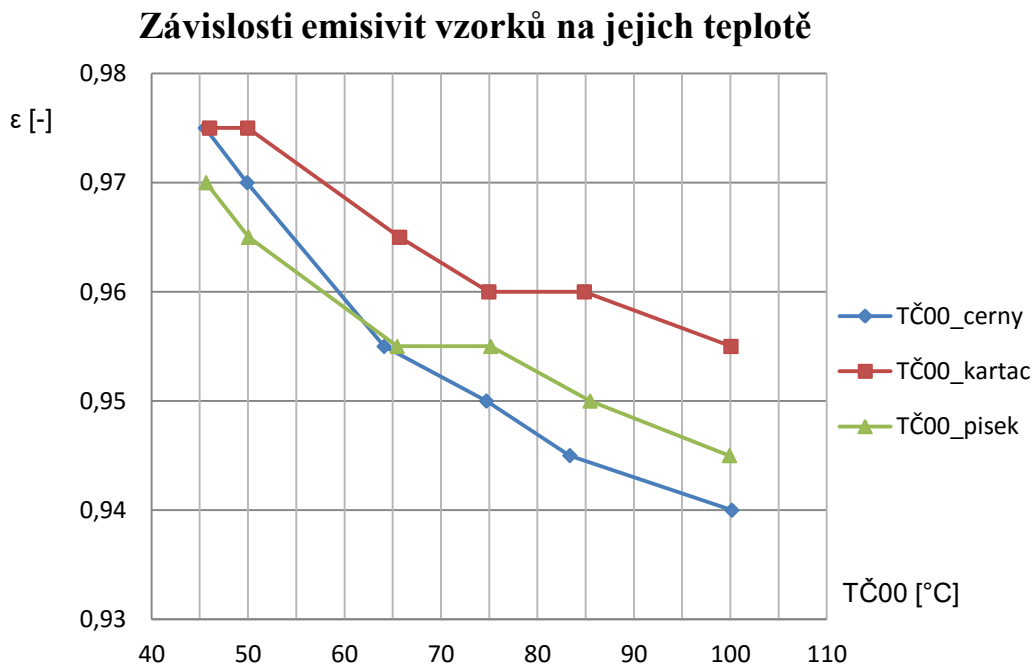
Dalším možným zpracováním naměřených dat je grafické zpracování, z něhož lze sledovat reálné chování zkoumaných vzorků. Většina uvedených grafických výsledků je vztažena k teplotě TČ00, tedy k teplotě měřené termočlánkem uprostřed vzorku, přímo nad výkonovým prvkem, který zahřívá vzorek.

Na obr. 26 je závislost emisivity na teplotě pro 2 měřené body, TČ00 a TČ01. Z tohoto obrázku (a z tabulky 11) lze pozorovat, že dural má vysoký teplotní spád a jeho prohřátí bylo téměř homogenní. Rozdíl teplot měřených uprostřed a v rohu se v závislosti na typu povrchové úpravy a proudovém zatížení lišil od 0,7 do 4,5°C, pro teploty měřené termočlánkem. U teplot měřených termokamerou byl zjištěn rozdíl od 0,7 do 6,0°C. Největší teplotní rozdíly vykazoval vzorek s leštěnou povrchovou úpravou.

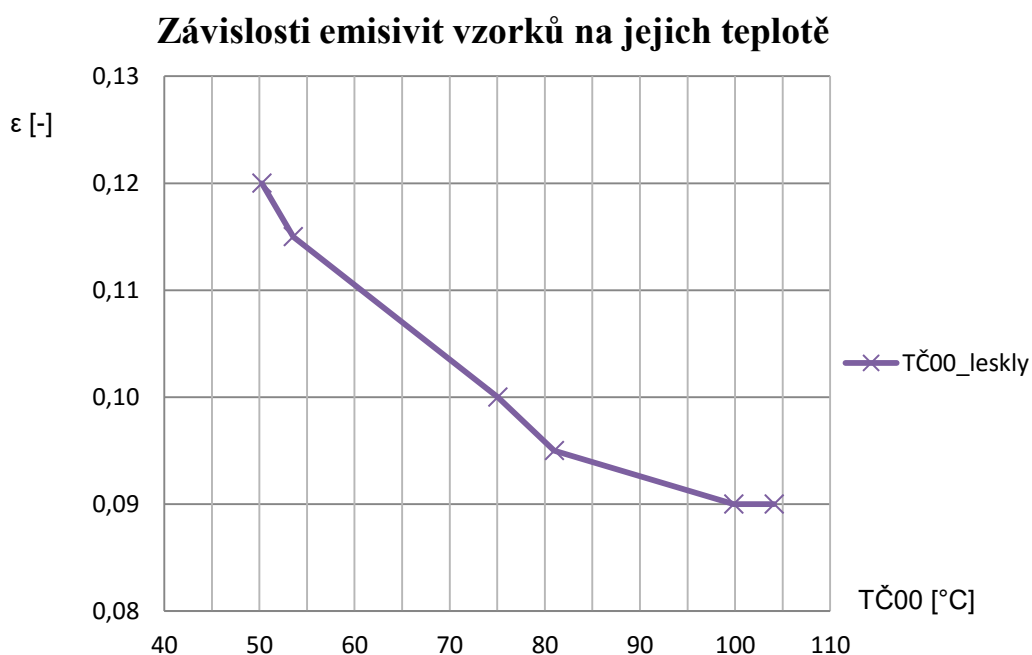


Obrázek 26 - Závislost emisivity na teplotě pro TČ00 a TČ01

Na obr. 27 a 28 je znázorněna závislost emisivit jednotlivých vzorků na teplotě. Tyto grafy jsou rozděleny do dvou obrázků kvůli lepšímu grafickému zobrazení, jelikož emisivita leštěného vzorku se pohybuje téměř o řád níž. Z grafů je vidět, že nejvyšší hodnotu emisivity měl kartáčovaný vzorek. Hodnota emisivity v závislosti na teplotě vzorku pro černěný, kartáčovaný a pískovaný vzorek se pohybovala pod hranicí 1,0. Zatímco u leštěného kolem 0,10 a z tohoto důvodu má tento vzorek nejmenší schopnost odvodu tepla od výkonového zdroje.

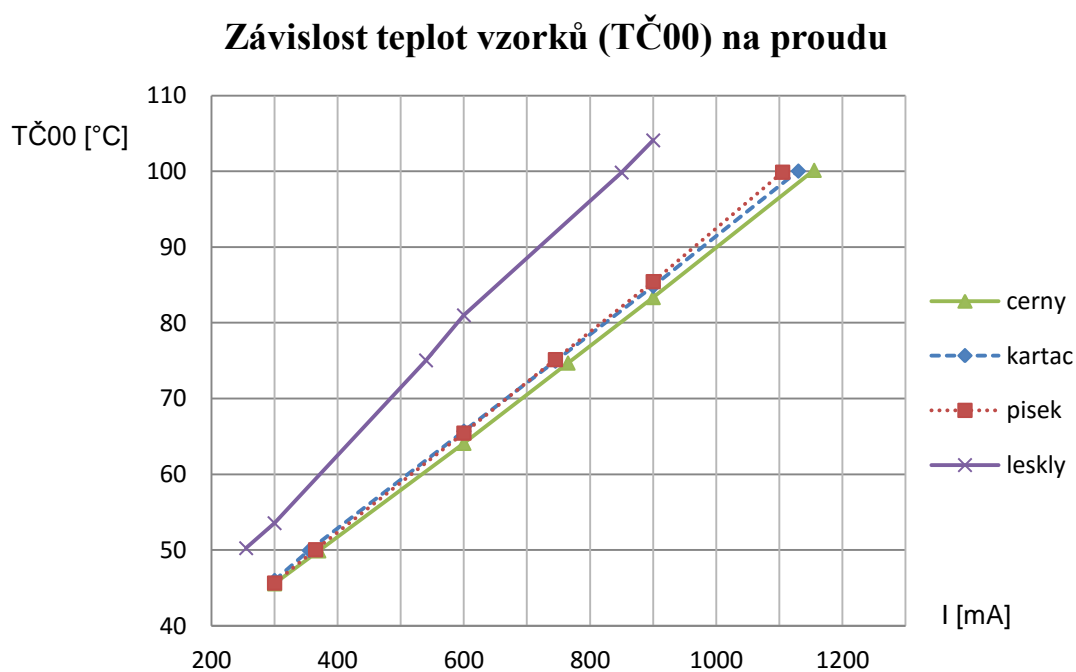


Obrázek 27 - Závislost emisivit vzorků na jejich teplotě



Obrázek 28 - Závislost emisivit vzorků na jejich teplotě 2

Na obr. 29 je zobrazena závislost teplot vzorků na přiloženém proudovém zatížení.



Obrázek 29 - Závislost teplot vzorků na proudovém zatížení

Z grafu na obrázku 29 vyplývá, že nejlepší schopnost odvodu tepla, tedy chlazení, dosahuje vzorek s černěnou povrchovou úpravou, který při daných proudových zatíženích vykazoval nejnižší hodnotu povrchové teploty. Naopak, dle předpokladů, se jeví jako nejhorší chladič materiál s leštěnou povrchovou úpravou, kdy leštěný povrch vykazoval, při proudu $I = 900 \text{ mA}$, o 20°C vyšší povrchovou teplotu než materiál s černěným povrchem.

Spektrometrické měření

Pro světlo emitující diody platí, že 70-80% dodávaného elektrického výkonu v závislosti na teplotě čipu, se nám promění v tepelný výkon, který bude zahřívat zkoumaný vzorek. Zbytek výkonu se promění ve světelný výstup LEDky. Pro srovnání např. účinnost žárovky se pohybuje pouze okolo 10-15%.

Účelem spektrometrického měření bylo určení světelných výstupů LED čipů. Získané výsledky se použily k určení binu diody. Na základě binu se z datasheetu zjistily tabulkové hodnoty závislosti tohoto výkonu (P_{th}) na teplotě, které jsou stěžejními hodnotami pro definování výkonu tepelného zdroje v simulaci.

Tabulka 12- Naměřené světelné výstupy spektrometrem

vzorek	U [V]	I [mA]	$\Phi 1$ [lm]	$\Phi 2$ [lm]	$\Phi 3$ [lm]	Φ [lm]	poznámka
1	8,73	400	277	275	276	276	kartáčovaný
	9,06	700	423	412	412	416	
	9,34	1000	483	467	503	484	
2	8,6	400	284	280	281	282	leštěný
	8,88	700	447	410	400	419	
	9,16	1000	473	478	490	480	
3	8,61	400	202	204	199	202	pískovaný
	8,89	700	299	295	297	297	
	9,16	1000	349	343	343	345	

Tabulka 13 - Hodnoty výkonu tepelného zdroje použité v simulaci

I=300 mA						
T_c [°C]	20	40	60	80	100	120
P_{th} [W]	1,89	1,9	1,91	1,93	1,96	2
I=600 mA						
T_c [°C]	20	40	60	80	100	120
P_{th} [W]	4,31	4,32	4,34	4,37	4,42	4,5
I=900 mA						
T_c [°C]	20	40	60	80	100	120
P_{th} [W]	7,05	7,06	7,09	7,13	7,21	7,31

Na základě naměřených dat vyplynulo, že použité LED čipy měly bin 8P se světelným tokem v rozmezí 630 – 710 lm. V tabulce 13 jsou pak uvedeny zjištěné hodnoty výkonu v závislosti na teplotě pro použitou LED.

4.2 Simulace

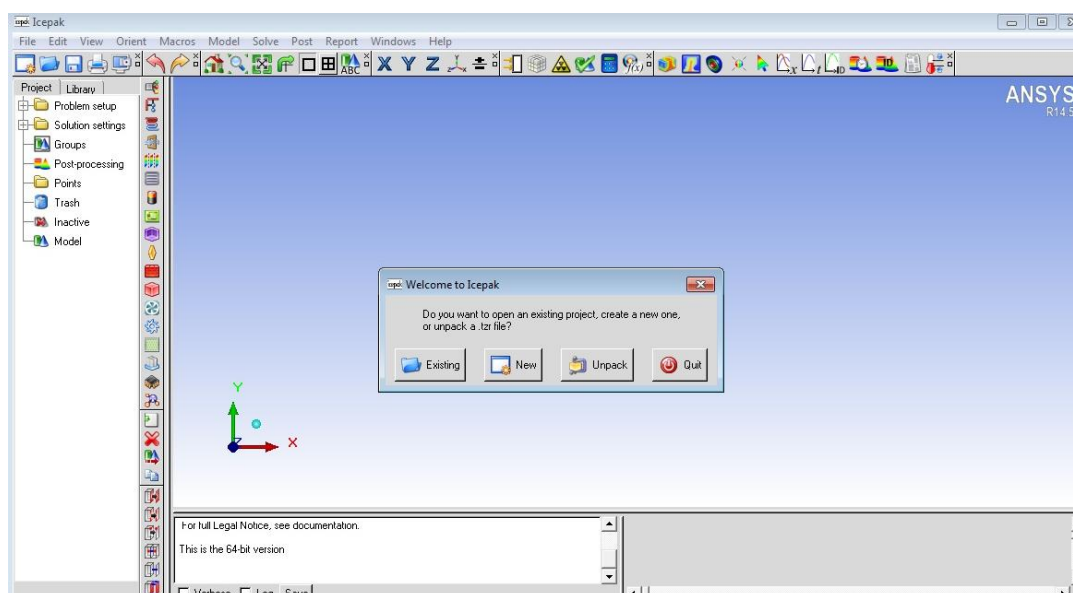
Pro simulace šíření tepla ve vzorku a jeho okolí jsem využil program ANSYS Icepak ve verzi 14.5. Podrobnější popis tohoto softwaru je uveden v kapitole 4.2.1.

4.2.1 ANSYS Icepak

ANSYS Icepak je program používaný pro teplotní simulace čipů, integrovaných obvodů, desek plošných spojů a komplexních elektronických sestav. Umožňuje v rámci jednoho grafického prostředí provádět simulace chlazení nebo oteplování elektronických systémů s uvažováním Joulova tepla, vedení, proudění a radiace [1].

Využívá se např. pro zjištění:

- teplot jednotlivých komponentů
- optimálního umístění chladících prvků
- degradace signálu vlivem tepla



Obrázek 30 - Základní okno programu ANSYS Icepak

ANSYS Icepak, stejně jako obdobné simulační programy, pracuje s metodou konečných prvků. Jde o numerickou metodu, která počítá na bázi soustavy diferenciálních rovnic. Proto je nutné nejdříve vytvořit síť prvků s uzly – tzv. mesh, v nichž se jednotlivé diferenciální rovnice řeší. Aby dané výpočty zkonvergovaly a dosáhlo se požadovaných výsledků, tak se musí správně nastavit základní kroky simulace:

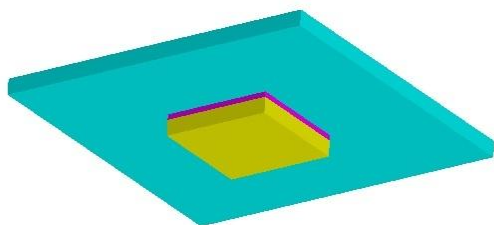
- vytvoření modelu
- definování materiálových vlastností
- vytvoření mesh-sítě
- nastavení parametrů simulace

Jednotlivé kroky simulace jsou blíže popsány v následující kapitole.

4.2.2 Nastavení simulace

Model

Model zkoumaných vzorků, jakožto výchozí prvek pro nastavení různých počátečních podmínek, byl vytvořen v prostředí ANSYS Icepak.



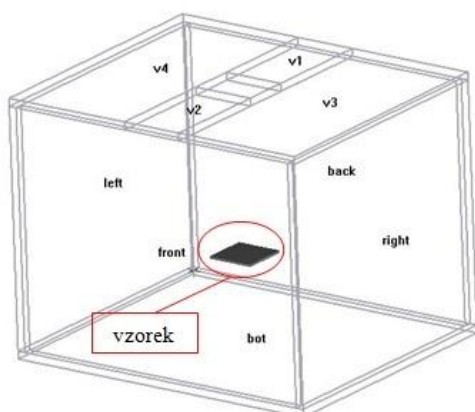
Obrázek 31 - Model vzorku (pohled zdola)

Popis modelu vzorku:

Celý tento model je sestaven z bloků a jeho nastavení je stěžejní pro výsledek simulace.

- žlutá = LED
- růžová = lepidlo/pasta
- modrá = chladič s danou povrchovou úpravou

Blok LED je definován jako teplotně závislý výkonový zdroj.

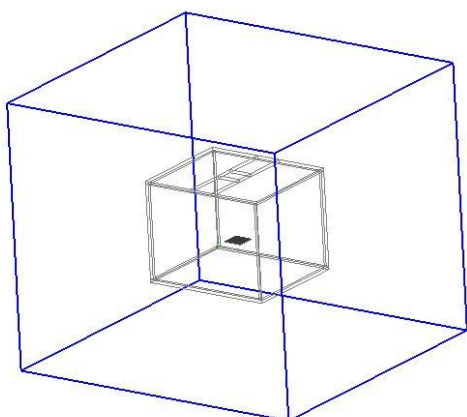


Obrázek 32 - Model kartonového boxu

Popis modelu boxu:

Model boxu je sestaven z bloků a uvnitř je umístěn model vzorku.

- left, right = levá a pravá strana boxu
- front, back = přední, zadní strana boxu
- bot = spodní strana boxu
- víko = které je sestaveno ze 4 bloků (v1, v2, v3, v4) a uprostřed je ponechán otvor



Obrázek 33 - Umístění modelu v cabinetu

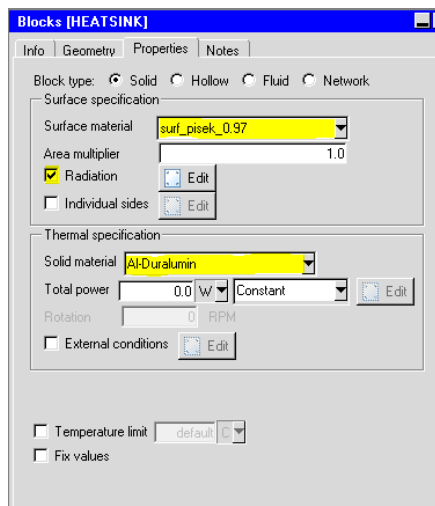
Popis modelu cabinetu:

Cabinet je základní prostor, v němž probíhají výpočty.

Uvnitř modelu cabinetu je umístěn model boxu se vzorkem.

Materiálové vlastnosti

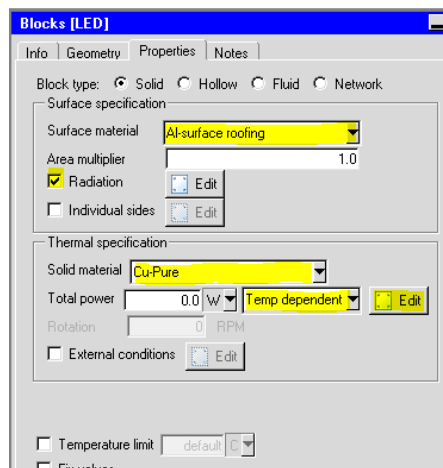
Z hlediska nastavení materiálových vlastností simulace bude nejdůležitější nastavení části chladiče, kde bude předmětem zkoumání jeho povrchová teplota a schopnost vyzařování tepelné energie. Nastavení bloku chladiče je následující:



Obrázek 34 - Nastavení bloku chladiče

Dalším blokem je teplovodivé lepidlo, zde bude důležité definovat pouze jeho tepelnou vodivost $\lambda = 2,3 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ (viz kap. 4.1.1), radiace zůstane vypnuta, výsledek simulace výrazněji neovlivní.

Posledním blokem je LED – blok, který je definován jako výkonový zdroj. Nastavení bloku LED je následující:



Obrázek 35 - Nastavení bloku LED

Povrchová specifikace:

- u tohoto bloku je zapnuta radiace
- materiál povrchu, resp. jeho emisivita a drsnost, bude pokaždé specifikována dle typu vzorku a naměřených hodnot (tabulka 11)

Tepelná specifikace:

- materiál bloku chladiče je definován jako dural s tepelnou vodivostí $\lambda = 164 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$

Povrchová specifikace:

- u tohoto bloku je zapnuta radiace, z důvodu přesnějšího výsledku
- definice povrchových vlastností výrazněji neovlivní výsledek simulace

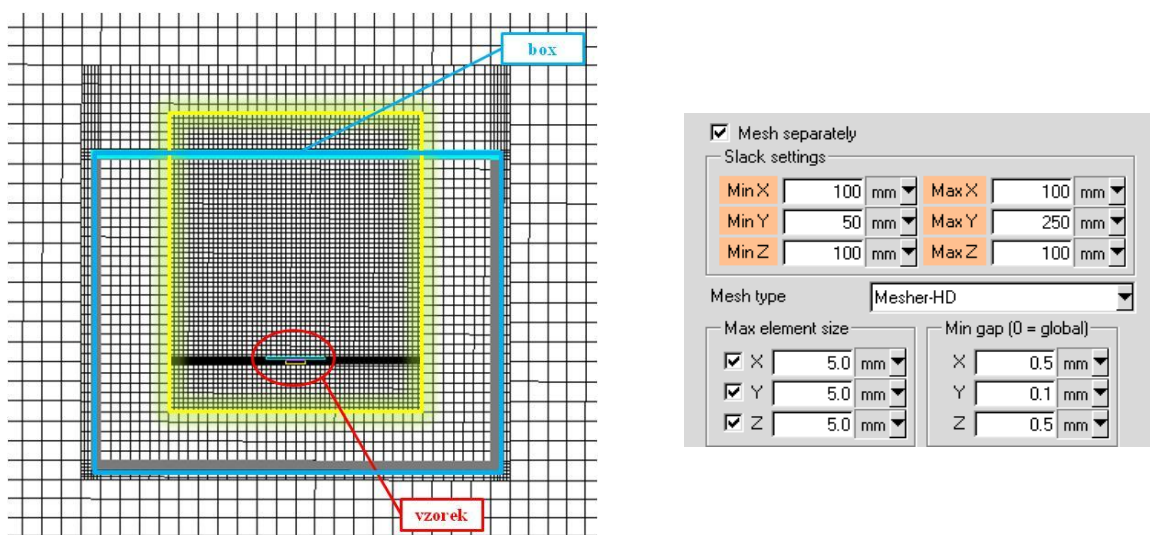
Tepelná specifikace:

- jedná se o zjednodušený model OSRAM LED čipu a pro lepší přenos tepla do chladiče, je tento blok definován jako čistá měď
- jedná se o teplotně závislý výkonový zdroj (viz. tabulka 13)

Mesh

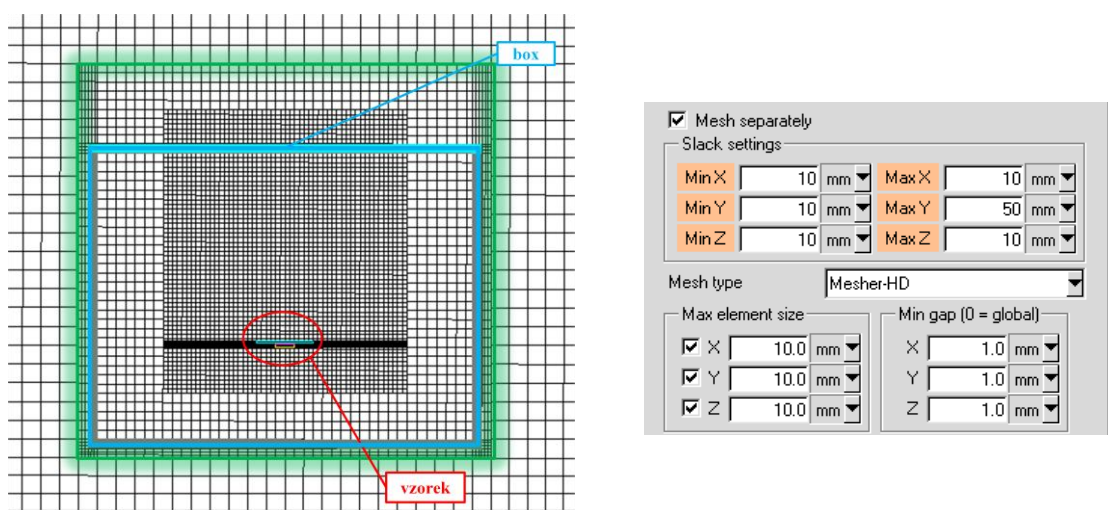
Vytvoření správné sítě prvků bylo důležité z hlediska konvergence, rychlosti výpočtů a správnosti výsledků. Právě z těchto důvodů došlo k vytvoření sítě na třech úrovních. Aby se mohlo víceúrovňově síťovat je nutné v nastavení povolit „samostatné síťování sestav“.

První úroveň, nejjemnější síť, je v těsné blízkosti vzorku a prostor nad chladičem, který je důležitý kvůli vyzařování tepla do prostoru. Rozložení nejjemnější sítě (žlutě označená) a její nastavení je na obr. 36.



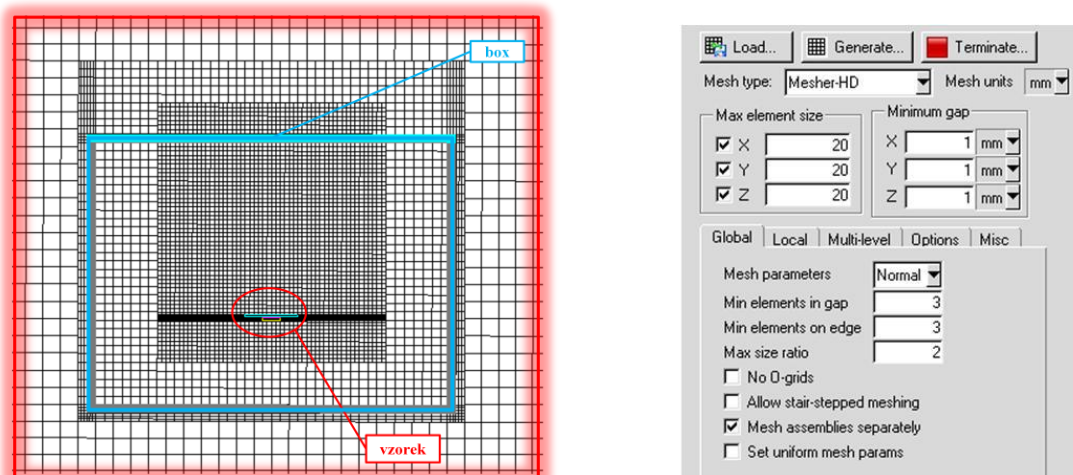
Obrázek 36 - Nastavení - menší mesh

Druhá úroveň vyplňuje zbylý prostor v boxu a v jeho těsné blízkosti. Hustota sítě je zde menší, protože výsledky simulace v tomto prostoru nejsou prioritním cílem pozorování. Rozložení druhé sítě (zeleně označená) a její nastavení je na obr. 37.



Obrázek 37 - Nastavení – větší mesh

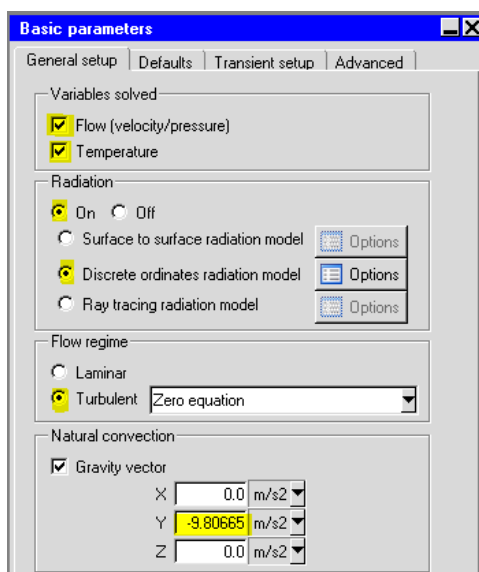
Třetí úroveň zasítování představuje globální síť, obecný prostor uvnitř cabinetu, který ještě nebyl zasítován. Jedná se o nejhrubší nastavení sítě a většinou se začíná právě tímto krokem. Pak se vnořují ostatní oddělené sítě prvků s jemnějším rastrem. Tento prostor výrazněji neovlivní výsledek simulace, proto je jeho nastavení nejhrubší. Rozložení sítě (červeně označená) a její nastavení je na obr. 38.



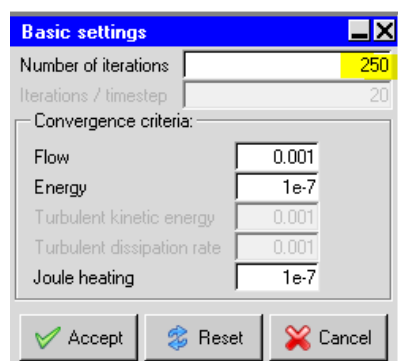
Obrázek 38 - Nastavení – global mesh

Parametry simulace

Posledním krokem bylo nastavení simulace. Zde se jednalo hlavně o záložky základních parametrů (obr. 39) a základního nastavení (obr. 40). V základních parametrech se nastavil výpočet teploty a toku, do výpočtu se zahrnula radiace, nastavil se správný typ proudění (v tomto případě turbulentní) a nastavila se správná hodnota gravitačního zrychlení vzhledem k osám modelu. V záložce základního nastavení se uvedl pouze maximální počet iterací do ukončení výpočtů. Většina simulací konvergovala zhruba u 180 iterace, pouze leštěný vzorek potřeboval ke konvergenci iterací 230.



Obrázek 39 - Základní parametry simulace



Obrázek 40 - Základní nastavení simulace

4.2.3 Výsledky simulace

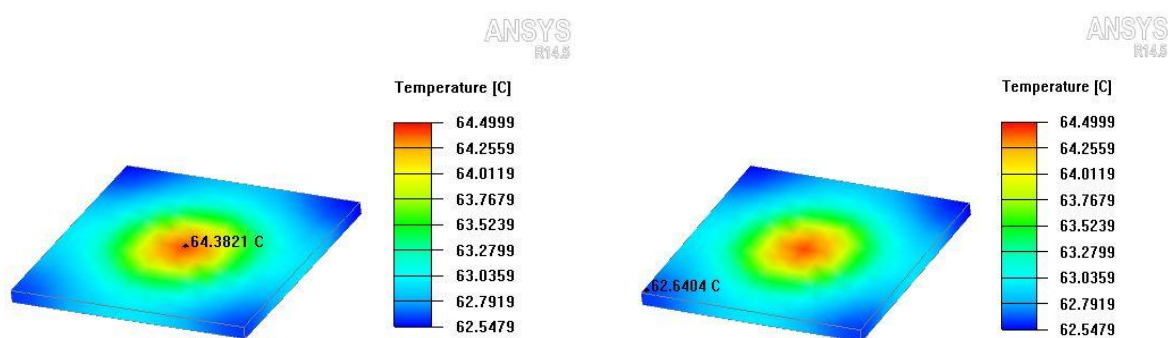
Výsledky simulace - tepelné

V této části práce jsou prezentovány výsledky simulací. Výsledné teploty u jednotlivých modifikací vzorků jsou zaokrouhleny na jedno desetinné místo a jsou uvedeny v tabulce 14. Pro vysvětlení zkratka **SIM00** – značí teplotu odečtenou uprostřed modelu a **SIM01** – značí teplotu odečtenou v rohu modelu, zhruba v místech kde probíhalo měření termočlánky a termokamerou, nejedná se tedy o maximální a minimální hodnoty teplot modelu vzorku s danou povrchovou úpravou. Kromě výsledných teplot jsou v tabulce uvedeny i hodnoty drsnosti povrchu a emisivity, které se v simulacích měnily v závislosti na typu vzorku. Jinak okrajové podmínky simulace byly pro všechny vzorky shodné.

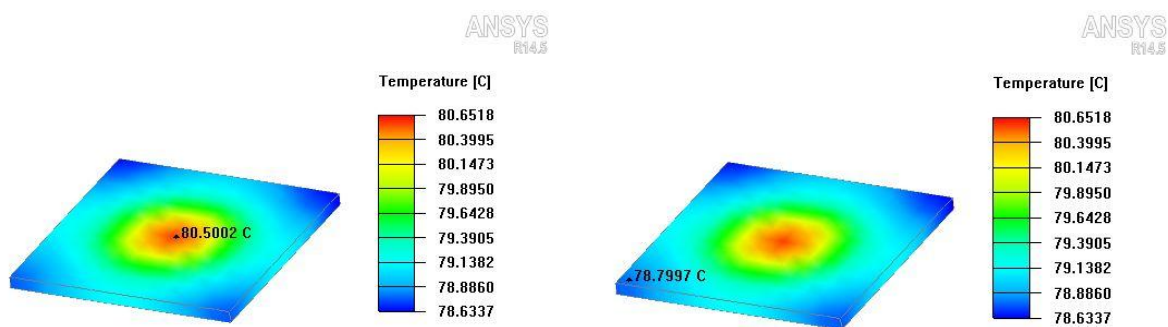
Tabulka 14 - Výsledky tepelné simulace

vzorek	Ra [μm]	emisivita	I [mA]	SIM00 [°C]	SIM01 [°C]
černěný	4,57	0,98	300	44,4	43,7
		0,96	600	64,4	62,6
		0,95	900	83,9	81,1
leštěný	0,33	0,12	300	53,0	52,3
		0,1	600	80,5	78,8
		0,09	900	107,8	105,0
kartáčovaný	0,84	0,98	300	44,4	43,7
		0,97	600	64,2	62,5
		0,96	900	83,7	80,9
pískovaný	1,95	0,97	300	44,5	43,8
		0,96	600	64,4	62,7
		0,95	900	83,9	81,1

Na obrázku 41 je vidět výsledek simulace rozložení tepla na chladiči s černěnou povrchovou úpravou. Jsou zde vyznačeny teploty SIM00 a SIM01. Na obrázku 42 je vidět výsledek simulace rozložení tepla pro leštěnou povrchovou úpravu.

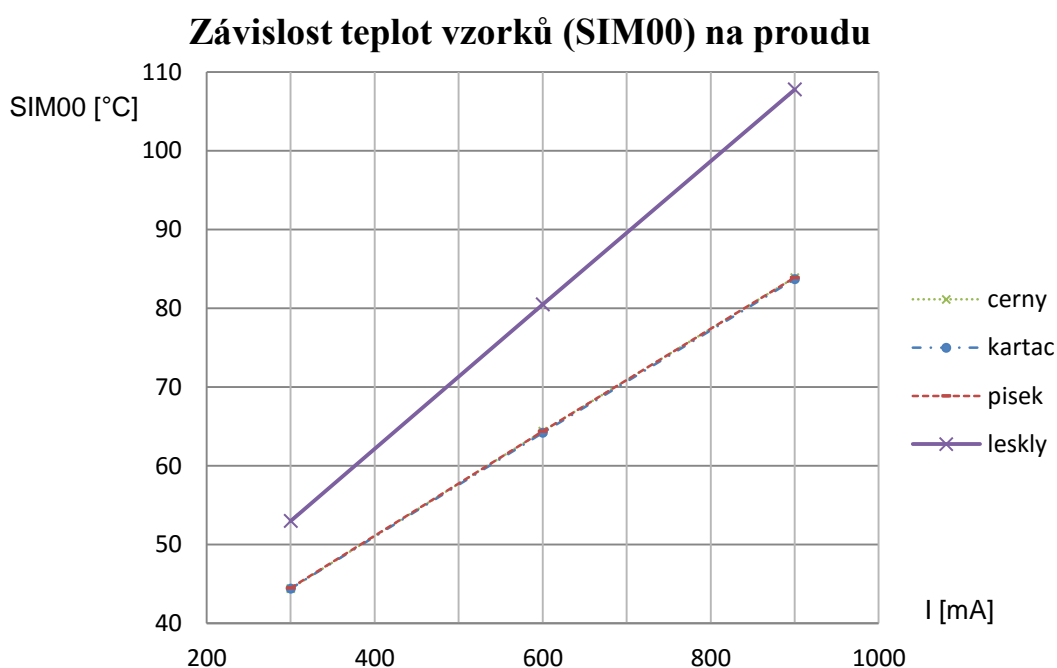


Obrázek 41 - Rozložení tepla - černěný vzorek (při I = 600mA)



Obrázek 42 - Rozložení tepla - leštěný vzorek (při $I = 600\text{mA}$)

Dalším možným zobrazením výsledků simulace je grafická závislost teplot povrchů vzorků na přiloženém proudu. Tento výsledek je zobrazen na obrázku 43.



Obrázek 43 - Závislost teplot vzorků (SIM00) na proudu

Z tabulky 14 je vidět, že nejvyšších teplot opět dosahoval leštěný povrch, kdy při $I = 600\text{ mA}$ měl zhruba o 16°C vyšší teplotu než ostatní vzorky a při $I = 900\text{ mA}$ mezi nimi byl rozdíl až $21,9^\circ\text{C}$. Dále teploty povrchů dle výsledků simulace pro černěný, kartáčovaný, pískovaný vzorek jsou shodné, v závislosti na hodnotě dosazené emisivity materiálu. Z toho plyne, že by drsnost povrchu neměla ovlivnit množství vyzařeného tepla, což bude ověřeno následující simulací. Stejný výsledek lze pozorovat z grafu na obr. 43, kdy se závislosti teplot vzorků na proudu pro černěný, kartáčovaný, pískovaný vzorek překrývají.

Výsledky simulace - drsnosti

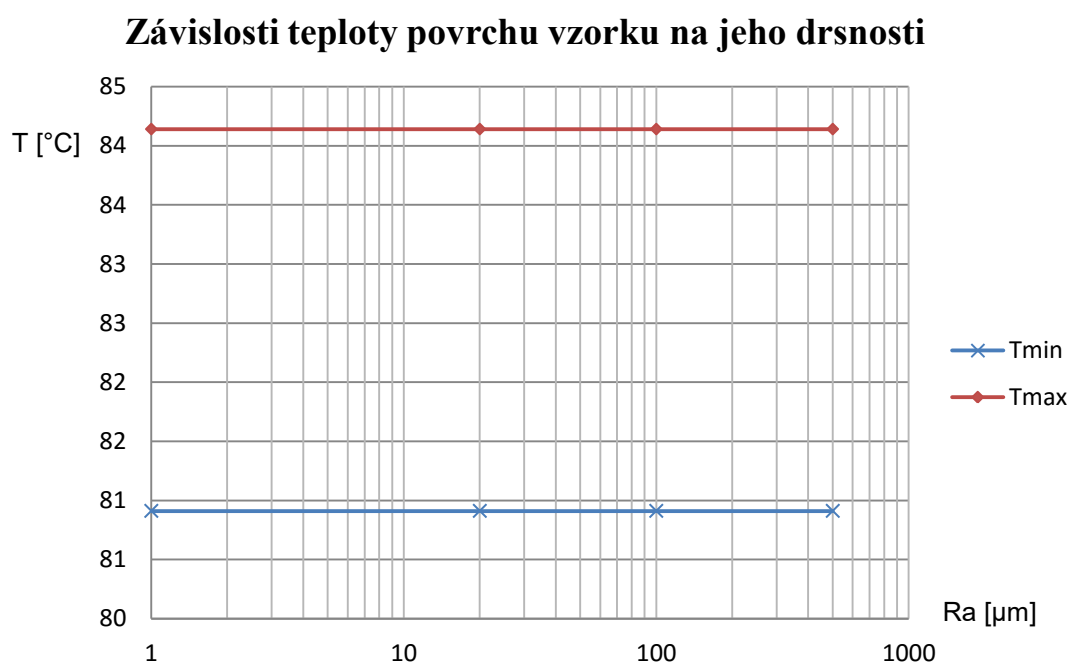
Dalším krokem bylo odzkoušení závislosti drsnosti povrchu – R_a [μm] na jeho schopnosti vyzařovat energii. Pro tepelné záření obecně platí, že struktura povrchu ovlivňuje pohlcování a odrazení světelného záření. Drsnost povrchu je tedy jednou z vlastností, která může ovlivnit hodnotu emisivity. Zjišťování závislosti emisivity na drsnosti povrchu však nebylo cílem experimentu.

Cílem této simulace bylo zjistit, zdali má drsnost povrchu vliv na množství vyzářené energie. Parametry simulace byly nastaveny shodně s tím rozdílem, že se měnila pouze drsnost povrchu chladiče. Emisivita byla pevně nastavena na hodnotu $\varepsilon = 0,95$ a proudové zatížení na $I = 900$ mA. V následující tabulce jsou uvedeny výsledky. T_{\min} je minimální teplota povrchu duralového chladiče a T_{\max} je naopak maximální teplota povrchu chladiče.

Tabulka 15 - Závislost teplot povrchu na jeho drsnosti

R_a [μm]	T_{\min} [$^{\circ}\text{C}$]	T_{\max} [$^{\circ}\text{C}$]
1	80,9112	84,1406
20	80,9112	84,1406
100	80,9112	84,1406
500	80,9112	84,1406

Na obr. 44 je grafické zobrazení této závislosti.

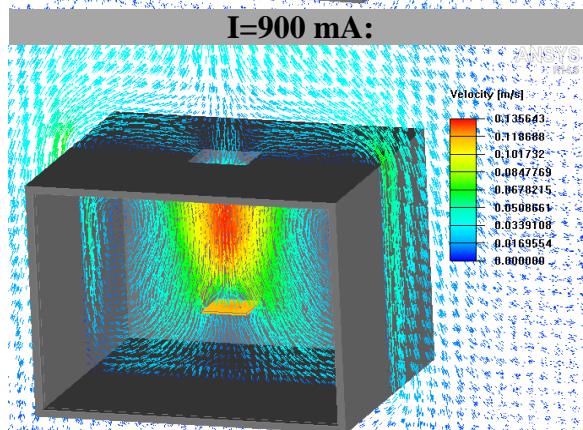
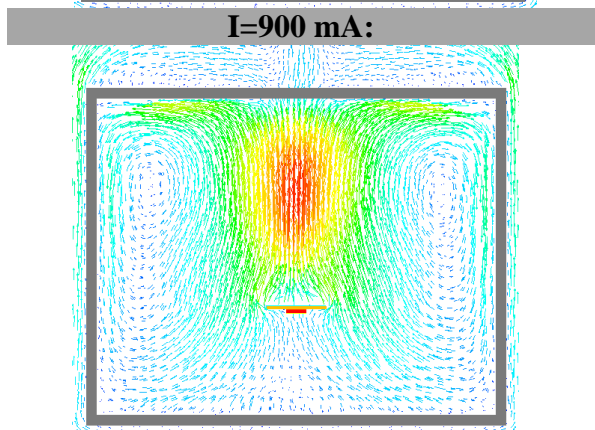
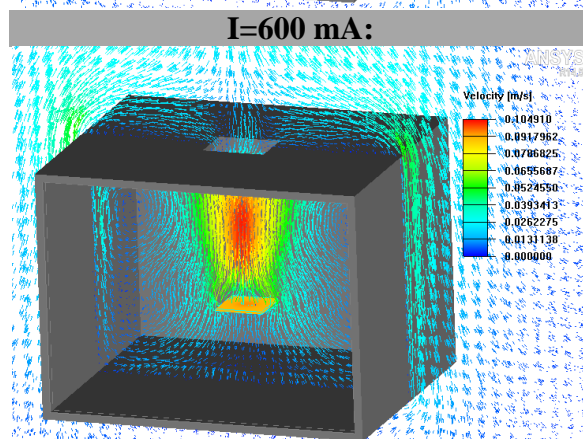
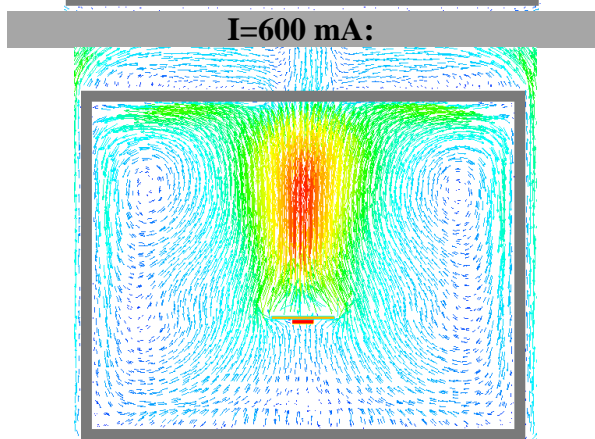
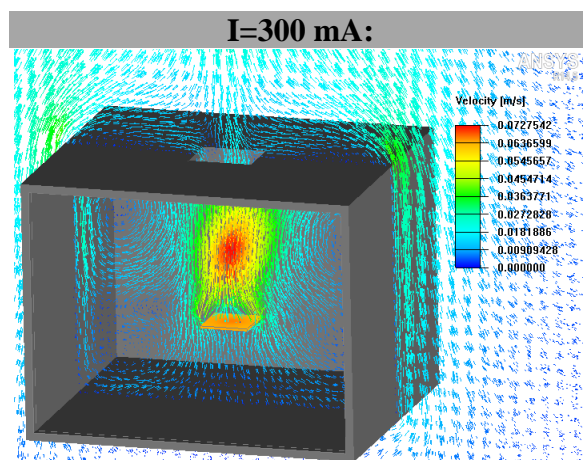
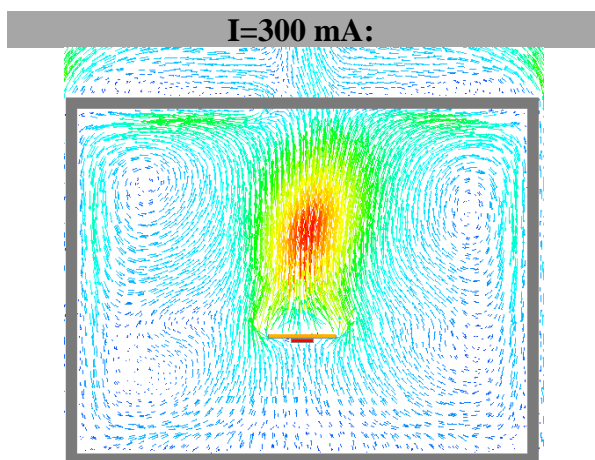


Obrázek 44 - Závislosti teploty povrchu vzorku na jeho drsnosti

Z výsledků této simulace lze pozorovat, že drsnost povrchu, která se skokově měnila od 1, 20, 100 do 500 μm , neměla vliv na množství vyzářené energie. Jinými slovy minimální a maximální teplota povrchu chladiče byla při každé simulaci stejná, $T_{\min} = 80,9112^{\circ}\text{C}$ a $T_{\max} = 84,1406^{\circ}\text{C}$.

Výsledky simulace proudění – pískovaný vzorek

Na následujících stránkách jsou vektorově vyobrazeny výsledky rychlosti proudění vzduchu – \mathbf{v}_v [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$] uvnitř a v okolí kartonového boxu pro všechny zkoumané vzorky.



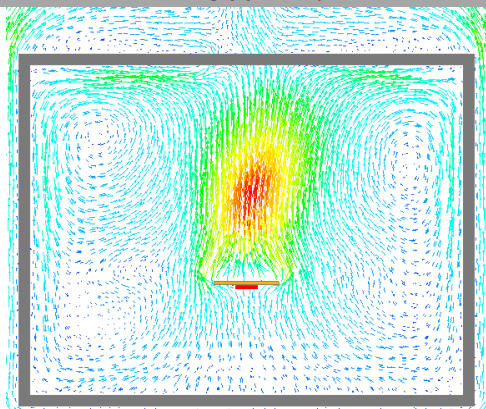
Obrázek 45 - Proudění - pískovaný (řez rovinou Z)

Obrázek 46 - Proudění - pískovaný (isometricky)

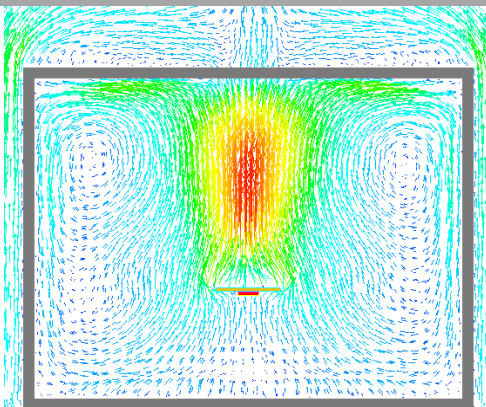
Na obrázcích 45 a 46 jsou zobrazeny výsledky simulace proudění pro pískovaný vzorek při různých proudových zatíženích. Na obr. 45 je zobrazen řez rovinou Z. Na obr. 46 je uveden isometrický pohled na umístěný vzorek uvnitř kartonového boxu.

Výsledky simulace proudění – černěný vzorek

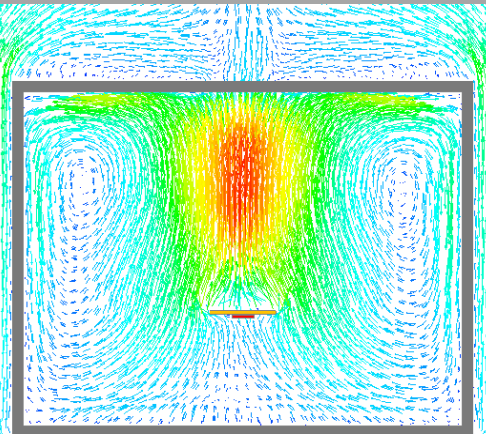
I=300 mA:



I=600 mA:

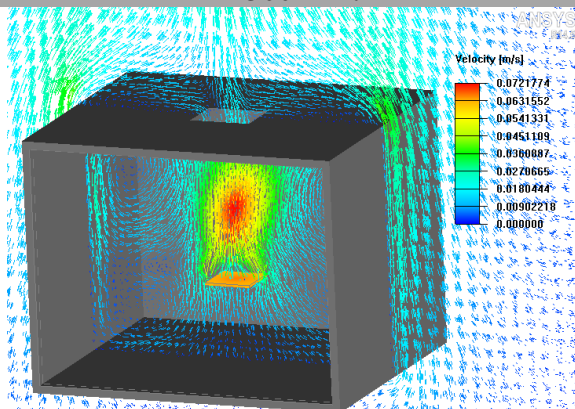


I=900 mA:

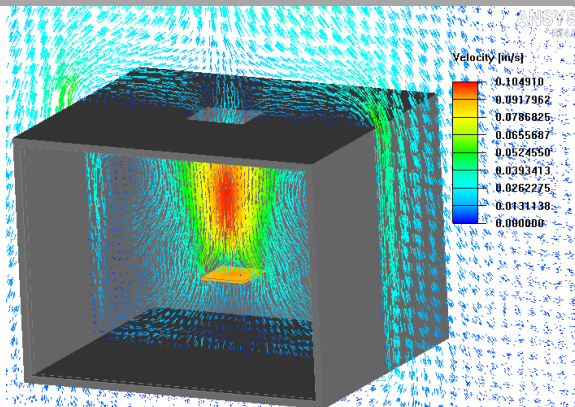


Obrázek 47 - Proudění - černěný (řez rovinou Z)

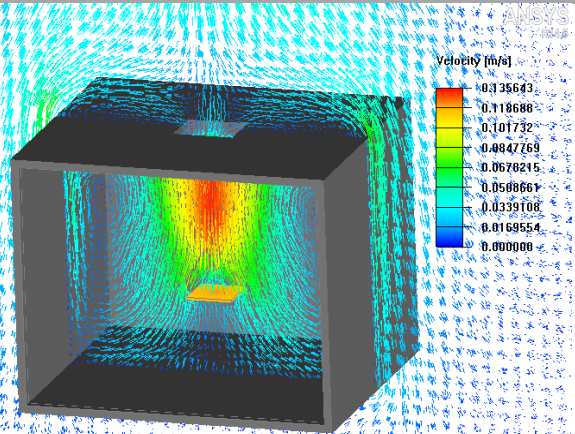
I=300 mA:



I=600 mA:



I=900 mA:

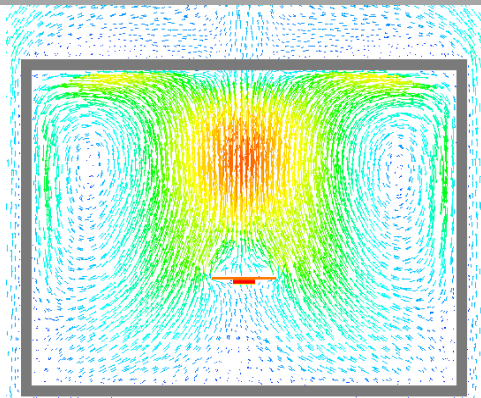


Obrázek 48 - Proudění - černěný (isometricky)

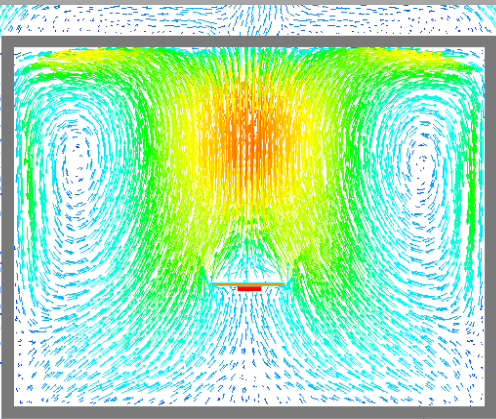
Na obrázcích 47 a 48 jsou zobrazeny výsledky simulace proudění pro černěný vzorek při různých proudových zatíženích. Na obr. 47 je zobrazen řez rovinou Z. Na obr. 48 je isometrický pohled na umístění vzorek uvnitř kartonového boxu.

Výsledky simulace proudění – leštěný vzorek

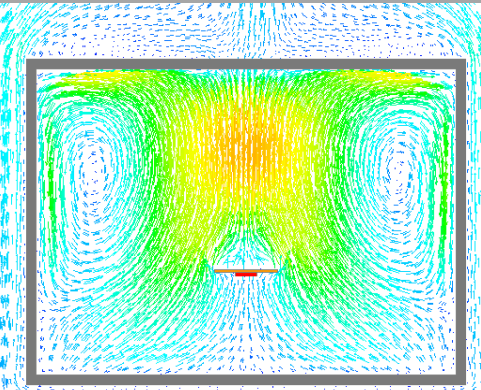
I=300 mA:



I=600 mA:

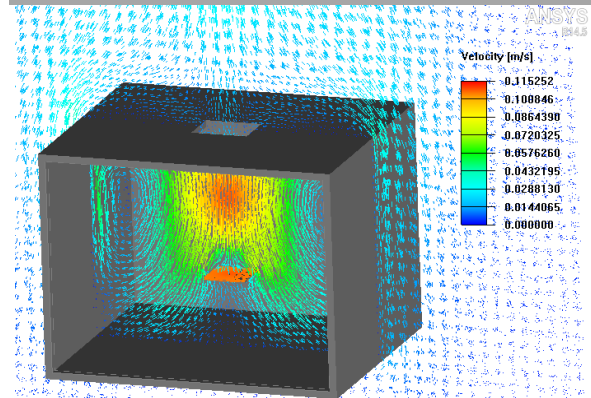


I=900 mA:

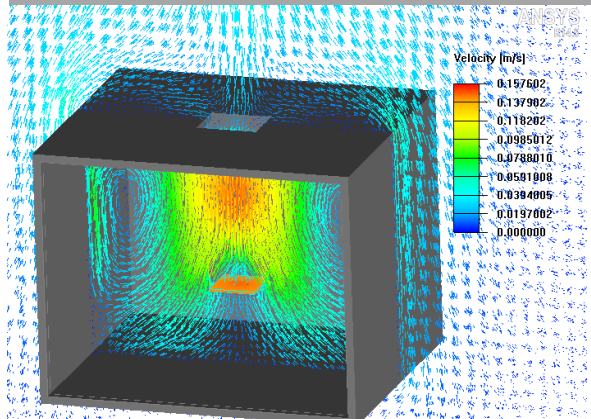


Obrázek 49 - Proudění - leštěný (řez rovinou Z)

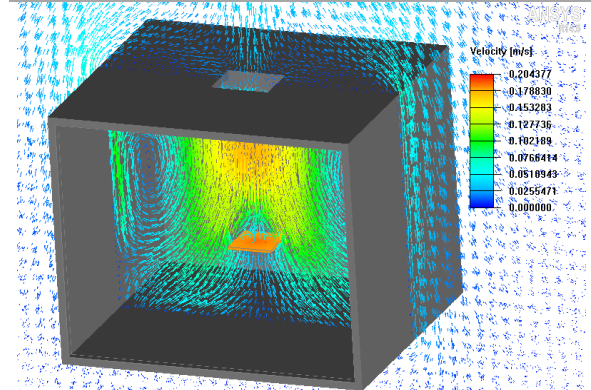
I=300 mA:



I=600 mA:



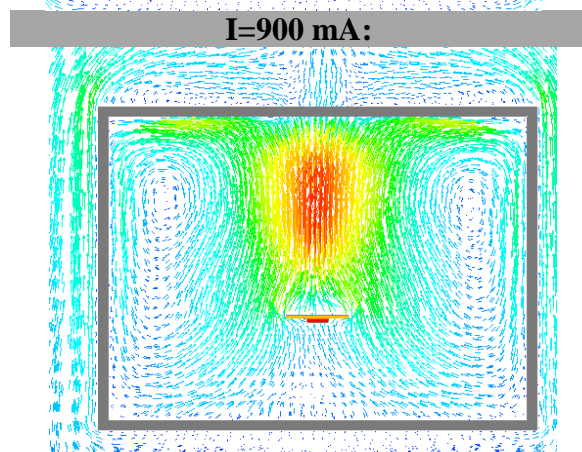
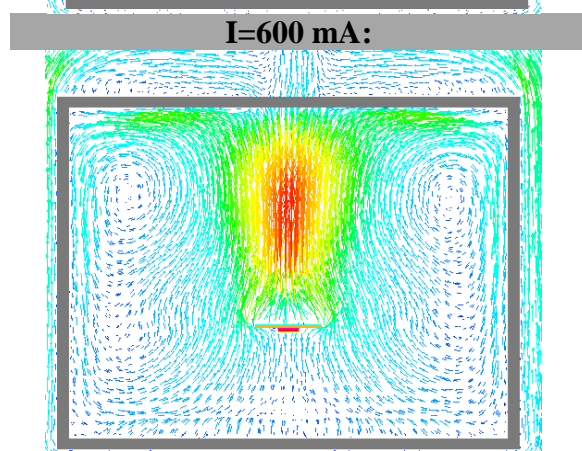
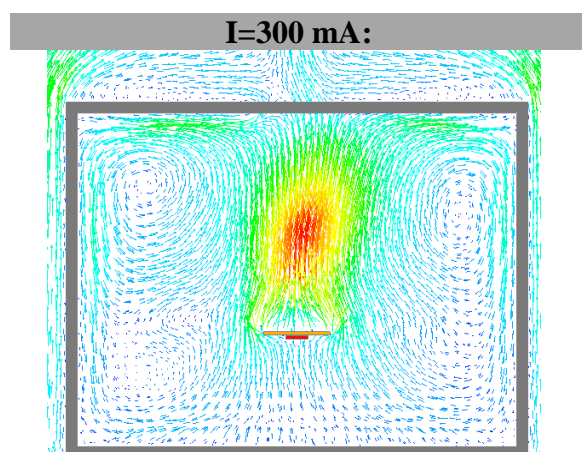
I=900 mA:



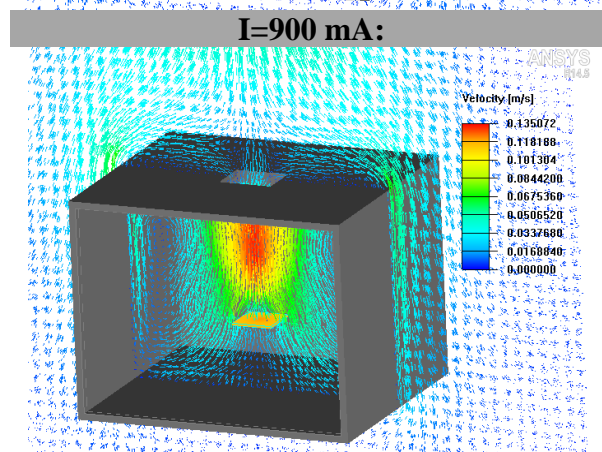
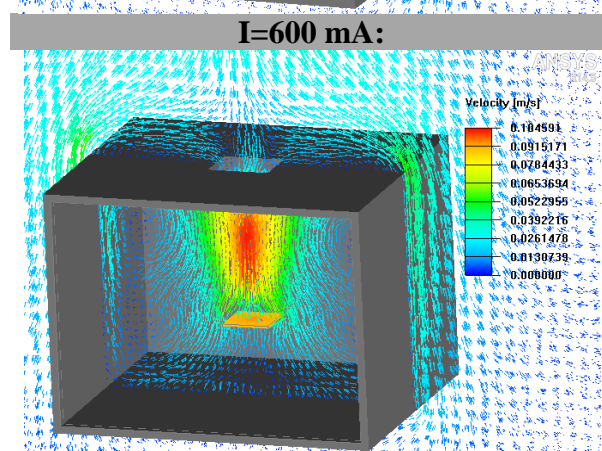
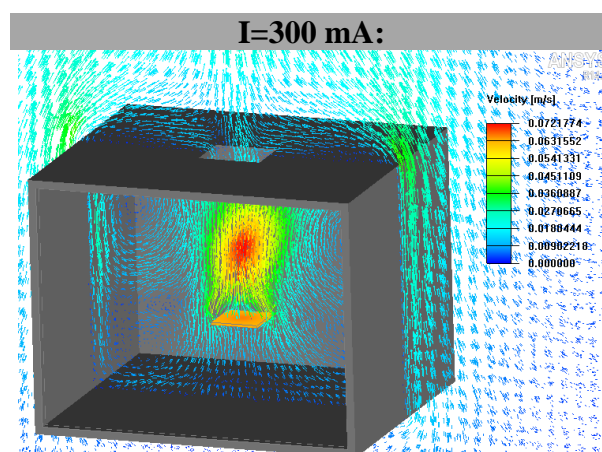
Obrázek 50 - Proudění - leštěný (isometricky)

Na obrázcích 49 a 50 jsou zobrazeny výsledky simulace vektorového proudění pro leštěný vzorek při různých proudových zatíženích. Na obr. 49 je zobrazen řez rovinou Z. Na obr. 50 je isometrický pohled na umístění vzorek uvnitř kartonového boxu.

Výsledky simulace proudění – kartáčovaný vzorek



Obrázek 51 - Proudění - kartáčovaný (řez rovinou Z)



Obrázek 52 - Proudění - kartáčovaný (isometricky)

Na obrázcích 51 a 52 jsou zobrazeny výsledky simulace proudění pro leštěný vzorek při různých proudových zatíženích. Na obr. 51 je zobrazen řez rovinou Z. Na obr. 52 je isometrický pohled na umístění vzorek uvnitř kartonového boxu.

V následující tabulce jsou uvedeny maximální rychlosti proudění vzduchu v okolí zkoumaného vzorku - v_{vmax} [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$] v závislosti na proudovém zatížení.

Tabulka 16 - Výsledky rychlosti proudění vzduchu

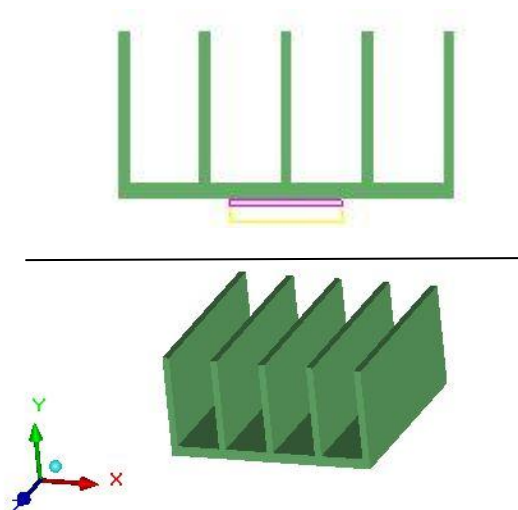
I [mA]	v_{vmax} [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$]	I [mA]	v_{vmax} [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$]
pískovaný		černěný	
300	0,0728	300	0,0722
600	0,1049	600	0,1049
900	0,1356	900	0,1356
leštěný		kartáčovaný	
300	0,1153	300	0,0722
600	0,1576	600	0,1046
900	0,2044	900	0,1351

Vektory proudění směřují od povrchu chladiče k otvoru v kartonovém boxu. Proudící vzduch, který neprojde otvorem ven, se láme o stěny krabice a směřuje zpět ke vzorku. Grafické výsledky proudění vzduchu pro pískovaný, černěný a kartáčovaný vzorek jsou téměř shodné. U leštěného vzorku můžeme pozorovat, že vzhledem k jeho vyšší teplotě je rychlost proudícího vzduchu vyšší. Nejvyšší rychlosti proudění dosahuje vzduch v radiační oblasti nad povrchem chladiče (červená oblast na snímcích s prouděním), číselně je to pro leštěný povrch (při $I = 900 \text{ mA}$) $v_{\text{vmax}} = 0,2044 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.

Výsledky simulace – chladič_1

V další části simulací byly vytvořeny dva rozdílné modely reálných chladičů, na kterých byl ověřen vliv emisivity na odvod tepla od výkonového prvku, popř. i vliv tvarování chladiče na odvod tepla. První model (chladič_1) je žebrovaný, druhý model (chladič_2) je složen z válcových ploch. Simulace byla nastavena na proud $I = 900 \text{ mA}$, s drsností povrchu chladiče $4,57 \text{ } \mu\text{m}$. Mesh byl ponechán stejný. Měnila se pouze emisivita od 0,95 do 0,98 a sledoval se její vliv na odvod tepla.

V této části je blíže popsán model chladiče_1:



Obrázek 53 - Model chladiče_1

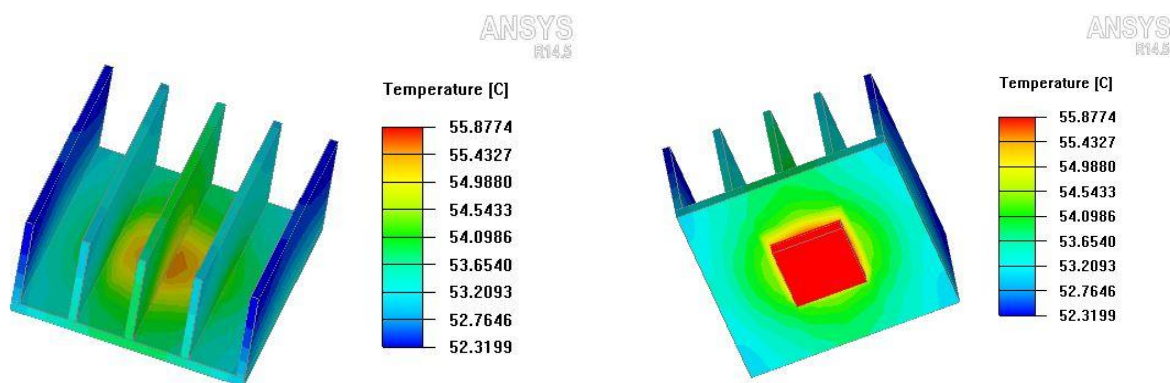
Popis modelu chladiče_1:

- žlutá = LED - blok
- růžová = lepidlo/pasta - blok
- zelená = chladič s danou povrchovou úpravou

Blok LED je definován jako teplotně závislý výkonový zdroj.

Chladič je definován jako prvek *heat sink*, materiál je dural s drsností povrchu $4,57 \text{ } \mu\text{m}$, chladič má 5 žeber s tloušťkou 2 mm orientovaných dle roviny z (naznačeno na obr. 53), výšku základny 3 mm a celkovou výšku 30 mm , radiace je zapnuta pro dosažení přesnějších výsledků.

Při tomto nastavení simulace konvergovala zhruba u 230 iterace. Na obr. 54 je zobrazeno rozložení tepla pro chladič_1, pohled z horní a spodní strany.



Obrázek 54 - Rozložení tepla při $\epsilon = 0,95$ pro chladič_1

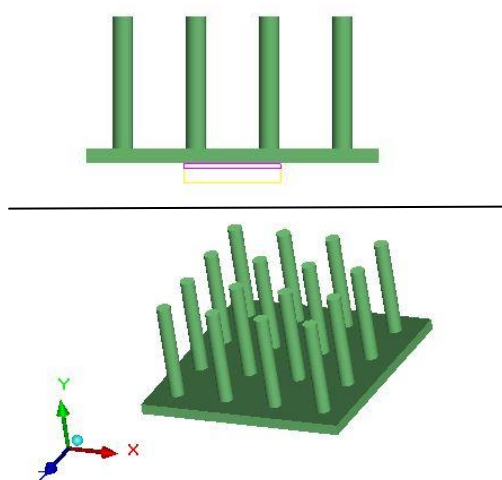
V tabulce 17 jsou uvedeny výsledky simulací pro minimální - T_{\min} a maximální - T_{\max} hodnoty teplot chladiče_1.

Tabulka 17 - Výsledky min. a max. teplot pro chladič_1

			chladič_1	
I [mA]	Ra [μm]	ε [-]	Tmin [°C]	Tmax [°C]
900	4,57	0,95	52,4978	56,0518
		0,96	52,4357	55,9902
		0,97	52,3770	55,9333
		0,98	52,3199	55,8774

Výsledky simulace – chladič_2

V následující části je blíže popsán model chladiče_2.



Obrázek 55 - Model chladiče_2

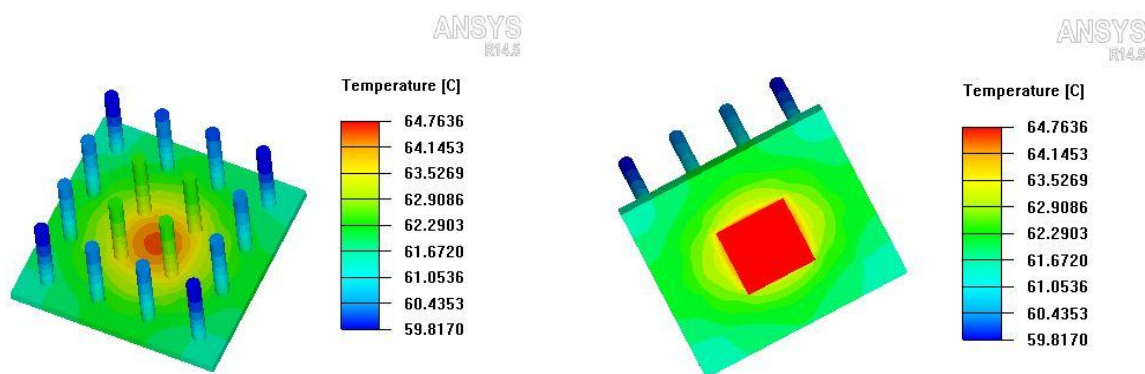
Popis modelu chladiče_2:

- žlutá = LED - blok
- růžová = lepidlo/pasta - blok
- zelená = chladič s danou povrchovou úpravou

Blok LED je definován jako teplotně závislý výkonový zdroj.

Chladič je definován jako prvek *heat sink*, materiál je dural s drsností povrchu 4,57 μm, chladič má 4 x 4 válcových výstupků s poloměrem 2 mm, výšku základny 3 mm a celkovou výšku 30 mm, radiace je zapnuta pro dosažení přesnějších výsledků

Při tomto nastavení simulace konvergovala zhruba u 280 iterace. Na obr. 56 je zobrazeno rozložení tepla pro chladič_2, pohled z horní a spodní strany.



Obrázek 56 - Rozložení tepla při ε = 0,95 pro chladič_2

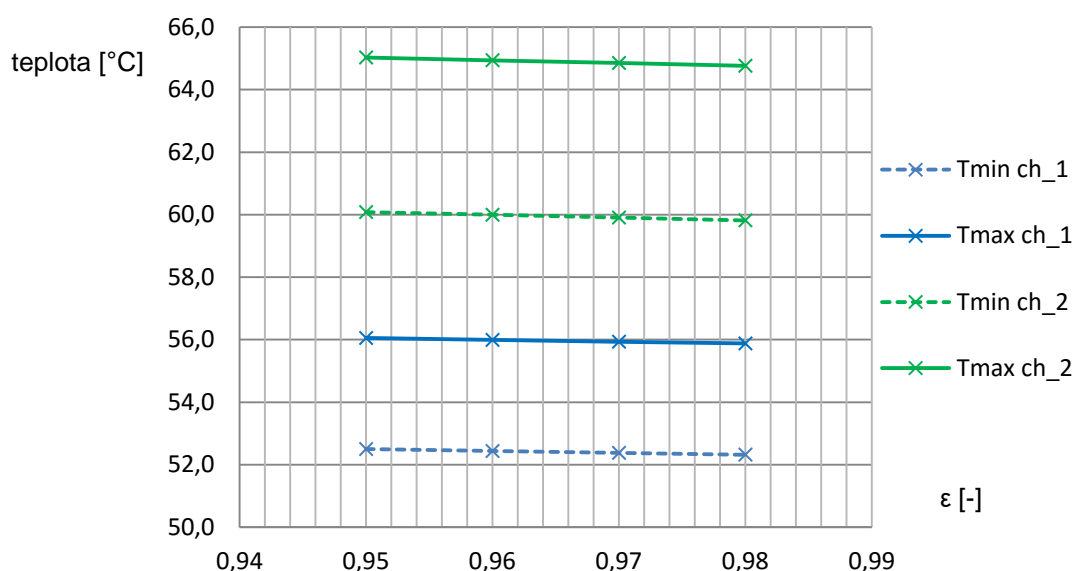
V tabulce 18 jsou uvedeny výsledky simulací pro minimální - T_{\min} a maximální - T_{\max} hodnoty teplot chladiče_2.

Tabulka 18 - Výsledky min. a max. teplot pro chladič_2

			chladič_1	
I [mA]	Ra [μ m]	ϵ [-]	Tmin [°C]	Tmax [°C]
900	4,57	0,95	52,4978	56,0518
		0,96	52,4357	55,9902
		0,97	52,3770	55,9333
		0,98	52,3199	55,8774

Na obrázku 57 je zobrazeno grafické srovnání teplot vymodelovaných chladičů v závislosti na jejich emisivitě. Jsou zde vykresleny max. a min. teploty pro oba modely. Pro vysvětlení např.: $T_{min\ ch_2}$ - znamená minimální teplota chladiče_2.

Závislost teplot modelů chladičů na jejich emisivitě



Obrázek 57 - Závislost teplot modelů chladičů na jejich emisivitě

Z výsledků těchto simulací lze pozorovat, že s rostoucí emisivitou klesala teplota obou modelů chladičů, kdy při zvýšení emisivity o jednu setinu (např. z 0,95 na 0,96), klesla průměrně maximální teplota chladiče_1 o 0,06°C a maximální teplota chladiče_2 o 0,09°C. Dále je z výsledků vidět podstatný rozdíl ve schopnosti odvádění tepla od výkonového zdroje v závislosti na tvaru použitého chladiče, resp. velikosti chladicí plochy. Z obrázků 53 a 55 je vidět, že žebrovaný chladič_1 má větší plochu k odvádění tepla, takže se předpokládal vyšší chladicí účinek, což se potvrdilo. Při stejné emisivitě je maximální teplota chladiče_1 o 9°C nižší. Tyto výsledky mohou být dále použity při návrhu ideálního chladiče.

4.3 Shrnutí výsledků

Závislost emisivity na teplotě, proudu

V následující části práce jsou ve stručnosti shrnuty výsledky experimentu. Z tabulky 19, která je uvedena pod tímto textem, vyplývá, že s rostoucím proudem, resp. teplotou, hodnota emisivity u všech měřených vzorků klesala. Dle očekávání měl nejnižší hodnotu emisivity leštěný vzorek, u něhož se pohybovala od 0,09 až po 0,12, což by zhruba odpovídalo tabulkovým hodnotám. Zbylé tři vzorky měly emisivitu velmi podobnou, od 0,94 po 0,98, přičemž tabulkové hodnoty uváděné v literatuře se pohybují od 0,7 do 0,9 pro opravdu hodně zoxidované drsné povrchy. Z tabulky 19 lze ještě vidět, že dural má vysoký teplotní spád a jeho prohřátí bylo téměř homogenní. Rozdíl teplot měřených uprostřed a v rohu se v závislosti na typu povrchové úpravy a proudovém zatížení lišil od 0,7 do 4,5°C, pro teploty měřené termočlánkem. U teplot měřených termokamerou byl zjištěn rozdíl od 0,7 do 6,0°C a u simulací vyšel rozdíl nejmenší od 0,7 do 2,8°C.

Při měření vznikaly jak nahodilé, tak systematické chyby. Z výsledků experimentu je patrné, že v procesu měření působí celá řada faktorů, které ovlivňují konečný výsledek. Z tohoto důvodu je praktické měření třeba brát jako orientační a vždy ho dávat do souladu s výsledky dosaženými simulacemi. To potvrzuje tu skutečnost, že experiment tvoří se simulacemi jedinou možnost, jak získat co nejvěrohodnější výsledek. Ideálním řešením by bylo ještě srovnání teplot vypočtených analytickými postupy.

Tabulka 19 - Shrnutí porovnání zjištěných teplot

	I [mA]	TČ00 [°C]	TK00 [°C]	SIM00 [°C]	TČ01 [°C]	TK01 [°C]	SIM01 [°C]	ε [-]
černěný	300	45,6	45,6	44,4	44,7	44,7	43,7	0,98
	600	64,1	64,0	64,4	62,7	62,2	62,6	0,96
	900	83,4	83,3	83,9	80,8	80,3	81,1	0,95
kartáčovaný	300	46,0	46,1	44,4	45,3	45,3	43,7	0,98
	600	65,7	65,7	64,2	64,3	63,8	62,5	0,97
	900	84,9	84,8	83,7	82,5	81,9	80,9	0,96
pískovaný	300	45,7	45,7	44,5	44,7	45,0	43,8	0,97
	600	65,5	65,5	64,4	63,8	63,7	62,7	0,96
	900	85,5	85,4	83,9	82,2	82,5	81,1	0,95
leštěný	300	53,6	53,7	53,0	52,4	50,2	52,3	0,12
	600	81,0	81,4	80,5	78,7	75,4	78,8	0,10
	900	104,1	103,8	107,8	102,1	98,6	105	0,09

Z grafu na obrázku 29 vyplývá, že nejlepší schopnost chlazení dosahuje vzorek s černěnou povrchovou úpravou, pro teploty měřené termočlánkem. Naopak, dle předpokladů, se jeví jako nejhorší chladič materiál s leštěnou povrchovou úpravou, kdy leštěný povrch vykazoval, při $I = 900 \text{ mA}$, o 20°C vyšší povrchovou teplotu než materiál s černěným povrchem. U výsledků simulací se křivky závislosti teplot na proudu pro černěný, kartáčovaný, pískovaný vzorek překrývají a nelze určit, který vzorek má lepší chladicí účinky. Nejhuře z tohoto hlediska dopadl opět leštěný vzorek, u něhož byla teplota povrchu až o 23°C vyšší.

Při porovnání teplot z termočlánků, termokamery a simulací zjistíme, že u pískovaného, černěného, kartáčovaného vzorku se pohybuje v rozmezí teplot $\pm 1,8^\circ\text{C}$, což se dá považovat za výborný výsledek. U leštěného vzorku jsme dosáhli mnohem horší přesnosti, kdy při $I = 900 \text{ mA}$ se nám teploty TK01 a SIM01 liší až o $6,4^\circ\text{C}$. Příčinou mohla být špatně nastavená kamera vzhledem ke vzorku, kdy se emitovaný tepelný obraz měřeného vzorku mohl odrážet do objektivu kamery a zkreslit tím výsledek.

Součástí práce byla i tepelná simulace vytvořených reálnějších modelů chladičů, než jen vzorku duralové destičky o rozměru $60 \times 60 \times 3 \text{ mm}$. Výsledkem této simulace je tvrzení, že s rostoucí emisivitou klesala teplota obou modelů chladičů, kdy při zvýšení emisivity o jednu setinu (např. z 0,95 na 0,96), klesla maximální teplota chladiče_1 o $0,06^\circ\text{C}$ a maximální teplota chladiče_2 o $0,09^\circ\text{C}$. Dále je z výsledků vidět podstatný rozdíl ve schopnosti odvádění tepla od výkonového zdroje v závislosti na tvaru použitého chladiče, resp. velikosti chladicí plochy. Z obrázků 53 a 55 je vidět, že žebrovaný chladič_1 má větší plochu k odvádění tepla, což výsledky uvedené v tabulkách 17 a 18 potvrdily. Při stejné emisivitě je maximální teplota chladiče_1 o 9°C nižší.

Vliv drsnosti povrchu na odvod tepla

Dalším pokusem bylo odsimulování vlivu drsnosti povrchu na účinek chlazení. Výsledkem je, že drsnost povrchu, která se skokově měnila od 1, 20, 100 do $500 \mu\text{m}$, neměla vliv na množství vyzařené energie. Jinými slovy minimální a maximální teplota povrchu chladiče byla při každé simulaci stejná a to $T_{\min} = 80,9112^\circ\text{C}$ a $T_{\max} = 84,1406^\circ\text{C}$.

Výsledky proudění

Posledním výsledkem práce je vektorové proudění vzduchu v okolí simulovaných modelů vzorků. Grafické výsledky proudění vzduchu pro pískovaný, černěný a kartáčovaný vzorek jsou téměř shodné a jsou uvedeny na straně 48 až 51. U leštěného vzorku můžeme pozorovat, že vzhledem k jeho vyšší teplotě je rychlost proudícího vzduchu vyšší (viz obr. 49 a 50). Dle výsledků uvedených v tabulce 16 dosahuje leštěný povrch rychlosti proudění vzduchu (při $I = 900 \text{ mA}$) $v_{\max} = 0,2044 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.

5 Závěr

V diplomové práci byl na základě zadání řešen problém emisivity a jejího vlivu na odvod tepla od výkonového prvku. Cílem bylo seznámit se s problematikou emisivity a jejího měření, navrhnout vhodnou měřicí metodu pro její experimentální určení, provést měření na vybraných materiálech a experimentálně získaná data použít pro simulaci šíření tepla v programu ANSYS.

V první části se práce zabývala teorií tepelného managementu, tedy výměnou tepla vedením, prouděním a radiací. Dále problematikou emisivity a způsoby jejího měření.

V následující části byla zvolena vhodná metoda měření, byly popsány zkonstruované měřicí vzorky, použité přístroje a prostor, v němž měření probíhalo. K měření byla použita metoda s použitím termočlánku a termokamery. Výstupem měření byly zjištěné hodnoty emisivity čtyř duralových vzorků s různou povrchovou úpravou a závislosti teplot povrchů těchto vzorků na přiloženém proudu. Ukázalo se, že dural má homogenní teplotní spád a rozdíl teplot vzorků uprostřed a v rohu byl minimální, v řádech jednotek °C. Z vytvořených grafických závislostí plyne, že nejnižší emisivitu měl vzorek s leštěným povrchem, hodnota emisivity se zde pohybovala okolo 0,1. Naopak nejlepší schopnost chlazení projevil vzorek s černěným povrchem. Byla prokázána i závislost emisivity na teplotě, která ve všech čtyřech případech s rostoucí teplotou klesala.

Další část práce byla věnována popisu simulačního programu ANSYS Icepak. Je zde popsáno vytváření modelu a nastavení tepelné simulace v závislosti na experimentálně zjištěných hodnotách emisivity. Vytváření modelu bylo v rámci práce detailně znázorněno a díky použitým obrázkům byl zřejmý vývoj od nejzákladnějšího simulačního modelu až po konečné výstupy. Dále byly prezentovány výsledky rozložení tepla vzorků, byly porovnány teploty naměřené termočlánky, termokamerou a teploty zjištěné ze simulace. V dalším kroku byly porovnány výsledky proudění vzduchu uvnitř krabice a v jejím těsném okolí. Z předložených obrázků je možné si udělat lepší představu o proudění vzduchu v blízkosti výkonového zdroje a chladiče. Nejvyšší rychlosti proudění vzduchu dosahoval vzorek s nejvyšší povrchovou teplotou, tedy vzorek s leštěným povrchem. Dále byl vyhodnocen vliv drsnosti povrchu na jeho schopnosti vyzařovat teplo, kdy se skokově měnila drsnost povrchu (1, 20, 100, 500 μm) a pokaždé byly zjištěny stejné teploty. Drsnost povrchu tedy teoreticky ovlivňuje hodnotu emisivity a prakticky neovlivňuje schopnost povrchu vyzařovat energii. Zde je nutno zdůraznit, že simulace probíhala vždy pro stejnou hodnotu emisivity. Na základě všech zjištěných informací byly vytvořeny modely dvou reálných chladičů, jeden žebrovaný a druhý s válcovými výstupky a zkoumal se vliv emisivity a tvaru na schopnost chlazení jednotlivých chladičů. Výsledky této simulace jen potvrdily předchozí tvrzení, že s rostoucí hodnotou emisivity roste účinnost chlazení daných materiálů. Dále lze tvrdit, že lepších chladičích schopností dosáhl žebrovaný chladič a to vzhledem k větší chladičí ploše, kterou disponoval.

V kapitole 4 byly shrnuty všechny dosažené výsledky jak praktického měření, tak simulací. Poznatky získané z této práce mohou sloužit jako materiál pro budoucí zkoumání vlivu emisivity na odvod tepla nebo při návrhu ideálního chladiče. Zajímavé by bylo odzkoušení vlivu vlhkosti na emisivitu, kdy by se vzorek na určitý čas vložil do klimatické komory a zkoumal by se vliv tenké vrstvy vody na povrchu vzorku na hodnotu emisivity. Veškerý vytvořený materiál a data jsou umístěny na CD.

6 Seznam zkratek

bin – kategorie součástek dle určitého parametru (např. světelného toku)

IMS – Insulated Metal Substrate (izolovaný kovový substrát)

LED – Light Emitting Diode (světlo emitující dioda)

mesh – počet prvků související s hustotou sítě

Ra – drsnost povrchu v [μm]

R&D – Research and Development (vývojové oddělení)

SIM00 – teplota odečtená ze simulace uprostřed modelu

SIM01 – teplota odečtená ze simulace v rohu modelu

TČ00 – teplota odečtená termočlánkem uprostřed modelu

TČ01 – teplota odečtená termočlánkem v rohu modelu

TK00 – teplota odečtená termokamerou uprostřed modelu

TK01 – teplota odečtená termokamerou v rohu modelu

T_{max} – maximální teplota

T_{min} – minimální teplota

T_{max} ch_1 – maximální teplota chladiče_1

T_{min} ch_1 – minimální teplota chladiče_1

T_{max} ch_2 – maximální teplota chladiče_2

T_{min} ch_2 – minimální teplota chladiče_2

v_v – rychlost proudění vzduchu

v_{vmax} – maximální rychlost proudění vzduchu

7 Literatura

- [1] ANSYS: Icepak. [Http://www.ansys.com](http://www.ansys.com) [online]. 2016 [cit. 2016-05-08]. Dostupné z: <http://www.ansys.com/Products/Electronics/ANSYS-Icepak>
- [2] Automotive Lighting: Úvod [online]. [cit. 2015-12-14]. Dostupné z: <http://www.al-lighting.cz/cs>
- [3] BRZOBOHATÝ, T. Měření emisivity vlhkých a suchých povrchů. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2012. 52 s. Vedoucí diplomové práce prof. Ing. Milan Pavelek, CSc.
- [4] Datalogger ALMEMO® 710: datasheet. [Http://www.ahlborn.cz](http://www.ahlborn.cz) [online]. [cit. 2016-05-08]. Dostupné z: http://www.ahlborn.cz/out/pictures/wysiwigpro/ALMEMO_710CZ.pdf
- [5] FEASA™ LED Spectrometer: datasheet. [Http://www.feasa.ie](http://www.feasa.ie) [online]. 2013 [cit. 2016-05-08]. Dostupné z: http://www.feasa.ie/PDFs/Feasa_Spectrometer.pdf
- [6] FLIR SC640 specifications: Camera specific. [Http://www.flir.com.hk/home/](http://www.flir.com.hk/home/) [online]. 2016 [cit. 2016-05-08]. Dostupné z: <http://www.flir.com.hk/cs/display/?id=41965>
- [7] FRŇKA, Tomáš, Václav FRŇKA, Petr MANGEL a Tomáš FIŠER. Bezdotykové měření emisivity. Zobrazování v IR spektru [online]. [cit. 2015-12-10]. Dostupné z: http://www.infrazareni.wz.cz/92_bezdotykovye/emivity.htm
- [8] GANČEV, J. *Perspektivní materiály pro pouzdření*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Ústav mikroelektroniky, 2014. 63 s., 1 s. příloh. Bakalářská práce. Vedoucí práce: doc. Ing. Ivan Szendiuch, CSc.
- [9] HRADÍLEK, Zdeněk, Ilona LÁZNIČKOVÁ a Vladimír KRÁL. Elektrotepelná technika. Vyd. 1. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011, 264 s. ISBN 978-80-01-04938-9.
- [10] Infračervená spektrometrie. *Výzkumné centrum Západočeské univerzity v Plzni: Termomechanika technologických procesů* [online]. [cit. 2015-12-10]. Dostupné z: https://tp.zcu.cz/www/files/projects/frvs-3892007/skripta_kap3_irspektrometrie.pdf
- [11] JAMNIA, Ali. Practical guide to the packaging of electronics: thermal and mechanical design and analysis. New York: Marcel Dekker, c2003, ix, 202 p. Mechanical engineering (Marcel Dekker, Inc.), 146. ISBN 08-247-0865-2.
- [12] Laboratorní jednokanálové napájecí zdroje TTI. [Http://www.tme.eu/cz/](http://www.tme.eu/cz/) [online]. [cit. 2016-05-08]. Dostupné z: http://www.tme.eu/html/CZ/laboratorni-jednokanalove-napajeci-zdroje-tti/ramka_11365_CZ_pelny.html

- [13] Mahr: MARSURF PS 1 mobilní zařízení na měření drsnosti. Mahr [online]. Proboštov [cit. 2016-05-15]. Dostupné z: <http://www.mahr.cz/cs/Produkty-a-sluzby/Vyrobní-měřicí-technika/Produkty/MarSurf---Mobilní-zařízení-na-měření-drsnosti/MarSurf-PS1---Mobilní-zařízení-na-měření-drsnosti/>
- [14] Newport Corporation [online]. 2015 [cit. 2015-12-14]. Dostupné z: <https://www.newport.com>
- [15] OSRAM OSTAR Headlamp Pro Datasheet. <Http://www.osram-os.com> [online]. 2015 [cit. 2016-05-08]. Dostupné z: http://www.osram-os.com/Graphics/XPic6/00179892_0.pdf/LE%20UW%20U1A3%2001%20-%20OSRAM%20OSTAR%20Headlamp%20Pro.pdf
- [16] PAVELEK, Milan. *Vizualizační a optické měřicí metody* [online]. 2006 [cit. 2015-12-10]. Dostupné z: <http://ottp.fme.vutbr.cz/~pavelek/>
- [17] REICHL, Jaroslav a Martin VŠETIČKA. *Encyklopedie fyziky: Záření absolutně černého tělesa* [online]. [cit. 2015-12-09]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com>
- [18] SCHENK, David. Optimalizace desky plošného spoje pro výkonovou LED. Brno, 2013. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav mikroelektroniky. Vedoucí práce Ing. Josef Vochoján, Ph.D.
- [19] ŠŤASTNÍK, Stanislav, Jan HOLLAN a Radek STEUER. *Možnosti určení emisivity materiálů pomocí infračervené termografie* [online]. [cit. 2015-12-10]. Dostupné z: <http://amper.ped.muni.cz/LW-infrared/omitky06.pdf>
- [20] Thermally Conductive Silicone Adhesive. <Http://www.acc-silicones.com> [online]. 2016 [cit. 2016-05-08]. Dostupné z: <http://www.acc-silicones.com/products/thermal-transfer-silicones/thermallyconductiveadhesive.ashx>