



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV AUTOMOBILNÍHO A DOPRAVNÍHO INŽENÝRSTVÍ

INSTITUTE OF AUTOMOTIVE ENGINEERING

**PŘENOS TEPLA V MODERNÍCH
AUTOMOBILOVÝCH SVĚTLECH**

HEAT TRANSFER IN MODERN AUTOMOTIVE LIGHTS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Radek Holec

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

prof. Ing. Josef Štětina, Ph.D.

BRNO 2022

Zadání bakalářské práce

Ústav:	Ústav automobilního a dopravního inženýrství
Student:	Radek Holec
Studijní program:	Strojírenství
Studijní obor:	Základny strojního inženýrství
Vedoucí práce:	prof. Ing. Josef Štětina, Ph.D.
Akademický rok:	2021/22

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Přenos tepla v moderních automobilových světlech

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Popis základních mechanismů přenosu tepla. Problematika proudění vzduchu a s ní související konvekce.

Mechanismy vzniku tepla v moderním světlometu.

Principy chlazení a distribuce tepla ve světlometu včetně chlazení elektroniky řídicí světlomet.

Princip pasivních a aktivních chladičů.

Snižování přechodových odporů.

Cíle bakalářské práce:

Práce má popsat problematiku přenosu tepla vznikajících v moderních světlometech a metody jejich chlazení. Bude se věnovat i chladičům chladící elektroniku řídicí světlometry.

Seznam doporučené literatury:

ÇENGEL, Yunus A., GHAJAR, Afshin. Heat and Mass Transfer: Fundamentals and Applications, 2020, 6th Edition ISBN: 9780073398198

INCROPERA, Frank, David DEWITT, Theodore BERGMAN a Adrienne LAVINE. Principles of heat and mass transfer. 7th ed., international student version. Singapore: John Wiley, c2013, xxiii, 1048 s. ISBN 978-0-470-64615-1.

WÖRDENWEBER, Burkard. Automotive lighting and human vision. New York: Springer, 2007. ISBN 978-354-0366-966.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2021/22

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Josef Štětina, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Začátek práce je věnován obecně světlu a také různým druhům osvětlení vozidel, zabývá se používanými druhy zdrojů světla a konkrétně u LED popisuje jeho chování při změně teploty. Druhá část je věnována přenosu tepla vedením, konvekcí a zářením, popisuje také veličiny a vztahy nutné pro řešení dalších kapitol. Dále je popsán teplotní management světlometu, tedy různé možnosti chlazení a příčiny vzniku tepla, jsou zde také shrnuty desky plošných spojů (PCB) používané v automotive. V poslední části je navržen chladič, který by měl sloužit pro chlazení LED čipů denního svícení.

KLÍČOVÁ SLOVA

světlomet, světlo, LED, chladič, PCB, tepelný odpor, teplotní simulace

ABSTRACT

The beginning of this thesis is dedicated to light in general and all different types of vehicle lighting, also deals with various types of light sources and specifically about LED where it describes the temperature change behaviour. Second part deals with heat transfer by conduction, convection, and radiation, it describes quantities and relationships needed for next capitols. In the penultimate part is described thermal management of headlights, therefore different options of cooling and causes of heat generation, and different types of PCBs that are used in automotive. In the last part is proposed the heatsink, which should be used for cooling LED chips of daytime running lights.

KEYWORDS

headlight, light, LED, heatsink, PCB, heat transfer resistance, heat simulation

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

HOLEC, R. *Přenos tepla v moderních automobilových světlech*. Brno, 2022. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav automobilního a dopravního inženýrství. Vedoucí bakalářské práce Josef Štětina. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/140630>.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracoval jsem ji samostatně pod vedením prof. Ing. Josefa Štětiny, Ph.D. a s použitím informačních zdrojů uvedených v seznamu.

V Brně dne 20. května 2022

.....

Radek Holec

PODĚKOVÁNÍ

Chtěl bych poděkovat mému vedoucímu prof. Ing. Josefu Štětinovi, Ph.D. za vedení a pomoc při tvorbě bakalářské práce, dále bych chtěl poděkovat pracovníkům firmy HELLA za podporu při psaní této práce a to především Ing. Martinovi Šanovcovi za cenné rady, které mi byly velmi nápomocné. Na závěr, ale především, bych chtěl poděkovat mé rodině a přítelkyni, bez jejichž podpory by nebylo možné tuto práci vypracovat.

OBSAH

Úvod.....	12
1 Osvětlení vozidla	13
1.1 Světlo.....	13
1.1.1 Teplota chromatičnosti.....	13
1.1.2 Světelný tok.....	14
1.1.3 Svítivost	14
1.1.4 Intenzita osvětlení	14
1.2 Přední světlomety automobilů.....	15
1.2.1 Historie.....	15
1.3 Druhy zdrojů světla	16
1.3.1 Klasická žárovka	16
1.3.2 Halogenová žárovka.....	16
1.3.3 Xenonová výbojka	16
1.3.4 LED.....	16
1.4 Tvorba bílého světla	17
1.4.1 RGB	17
1.4.2 Luminofor	18
1.5 Vliv teploty na parametry LED	18
1.5.1 Vliv na světelný tok	18
1.5.2 Vliv na změnu barvy	19
1.5.3 Vliv na životnost	19
1.6 Druhy osvětlení v předních světlech	20
1.6.1 Dálkové světlomety.....	20
1.6.2 Laserové světlomety	20
1.6.3 Směrová světla	20
1.6.4 Obrysová světla.....	20
1.6.5 Corner light	20
1.6.6 Denní svícení.....	21
1.6.7 Potkávací světlomety	21
1.7 Technologie matrix.....	21
2 Teorie přenosu tepla	22
2.1 Vedení tepla.....	22
2.1.1 Součinitel tepelné vodivosti	22
2.1.2 Mechanismus vedení tepla	23
2.1.3 Matematický popis přenosu	23
2.1.4 Diferenciální rovnice vedení tepla	24
2.1.5 Počáteční a okrajové podmínky	25
2.1.6 Vedení tepla přes rovinnou stěnu.....	26
2.1.7 Analogie k elektrickému proudu.....	28
2.1.8 Prostup složenou zdí	28
2.2 Konvekce.....	28
2.2.1 Součinitel přestupu tepla.....	28
2.2.2 Mechanismus konvekce	29
2.2.3 Laminární a turbulentní proudění	30
2.2.4 Teorie podobnosti	30

2.2.5	Podobnostní čísla.....	30
2.2.6	Kriteriální rovnice.....	32
2.3	Záření	32
2.3.1	Mechanismus	32
2.3.2	Emisivita povrchu.....	32
2.3.3	Kirchhoffovy zákony	33
2.3.4	Matematický popis přenosu.....	33
2.3.5	Záření malého povrchu ve velkém prostoru, který jej obklopuje.....	35
2.3.6	Tepelný odpor zářením	36
3	Teplotní management světlometu	37
3.1	Příčiny vzniku tepla	37
3.2	Pasivní chlazení	37
3.3	Aktivní chlazení	38
3.4	Chladiče	38
3.4.1	Materiály chladičů	38
3.4.2	Metody výroby chladičů	38
3.5	PCB.....	39
3.5.1	FR4	39
3.5.2	IMS	41
3.6	Tepelný odpor LED	42
3.7	Přenos tepla z LED na chladič.....	43
3.8	Snižování přechodových odporů.....	43
3.9	Proudění ve světlometu.....	47
4	Návrh chladiče a PCB	48
4.1	LED čip.....	48
4.2	Chladič	48
4.3	PCB	50
4.4	Simulace.....	51
4.4.1	Podmínky simulace	51
4.4.2	FR4 + deskový chladič	51
4.4.3	FR4 + chladič se žebry	52
4.4.4	FR4 s via + deskový chladič.....	53
4.4.5	FR4 s via + chladič se žebry	54
4.4.6	IMS + deskový chladič.....	55
4.4.7	IMS + chladič se žebry	56
4.5	Výsledky simulací.....	57
	Závěr	58
	Použité informační zdroje.....	59
	Seznam použitých zkratk a symbolů.....	65

ÚVOD

Světlomety jsou nedílnou součástí automobilů a tvoří zásadní bezpečnostní prvek. Díky rozvoji technologie LED se čím dál častěji nahrazují staré typy zdrojů světla, jako jsou halogeny nebo xenony, již zmíněnou technologií LED, jelikož ta umožňuje zvýšení světelného výkonu světlometů a prodloužení jejich životnosti.

Velmi je diskutována otázka chlazení, jenž je nutné pro zachování vysoké životnosti LED, protože ta kvůli zvyšující se teplotě klesá. Proti této snaze o zlepšení chlazení světlometů jde trend zmenšování světel, kdy čím dál tím více světel je koncipováno pouze do úzkých proužků. Toto provedení soustředí většinu zdrojů tepla do jednoho místa a tím způsobuje obtížné chlazení. Také vzniká nový problém s chlazením LED čipů použitých pro světlovody, které se staly oblíbeným prvkem pro světla denního svícení a směrová světla, nicméně pro správný chod potřebují světelné zdroje o vysokém výkonu.

Pro usazení LED čipů se používají PCB (desky plošných spojů), které mají zásadní roli v teplotním managementu světlometu, konkrétně jako prostředek vedoucí teplo z čipu do chladiče nebo do okolí. Nejvíce jsou používané technologie FR4 a IMS, které mají své specifické vlastnosti a použití. Je nutné také řešit problematiku přechodového tepelného odporu mezi PCB a chladičem, kdy při špatné konstrukci kontaktu může dojít k velkému snížení množství přeneseného tepla z PCB na chladič, a tím pádem k znehodnocení funkčnosti celého systému.

Návrh chladiče vzešel z vývojového oddělení firmy HELLA Mohelnice, která se zabývá vývojem i výrobou světlometů a zadních svítidel pro všechny segmenty automobilů a dalších dopravních prostředků.

1 OSVĚTLENÍ VOZIDLA

Osvětlení vozidla slouží k osvětlení okolního a vnitřního prostoru, přístrojů vozidla a také k upozornění ostatních účastníků provozu na přítomnost vozidla. Mezi jeho funkce patří:

- Potkávací světla
- Dálková světla
- Zpětná světla
- Obrysová světla
- Výstražná světla
- Brzdová světla
- Směrová světla
- Osvětlení přístrojů
- Denní svícení
- Vnitřní osvětlení
- Osvětlení registrační značky
- Mlhová světla – přední/zadní [1]

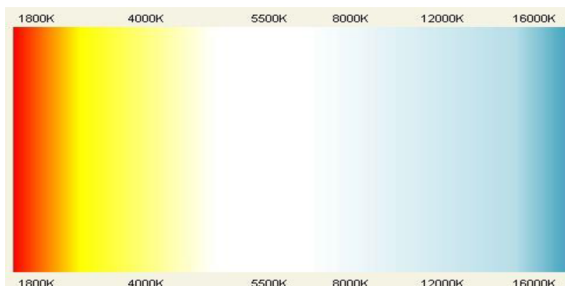
Dále se tato práce bude věnovat světlům, která jsou obvykle obsažena v předních světlometech automobilů, tedy potkávacím světlům, dálkovým světlům, obrysovým světlům, směrovým světlům a také čím dál častěji používaným světlům denního svícení. Nyní je vhodné, pro pochopení vlastností světlometů a svítidel, vysvětlit co je to světlo.

1.1 SVĚTLO

Světlo je elektromagnetické vlnění o vlnové délce 390 až 760 nm [2]. Má duální charakter, což znamená, že jej lze považovat za vlnění i proud částic. Ve vakuu se světlo šíří rychlostí 300 000 km/s.

1.1.1 TEPLOTA CHROMATIČNOSTI

Je to charakteristika světla, která odpovídá barvě tepelného záření vydávané černým tělesem, zahřátého na danou teplotu. Jednotkou je Kelvin [K]. Obvyklé hodnoty u světlometů jsou mezi 4000 až 6500 K.



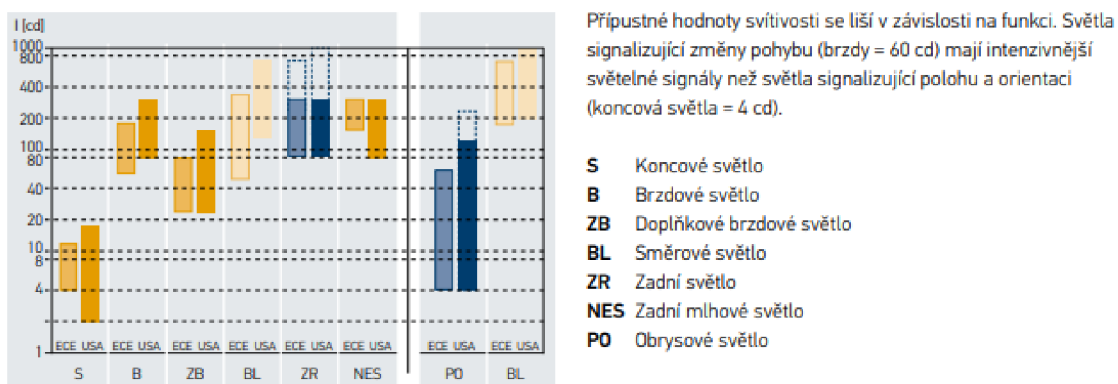
Obr. 1 Ukázka teploty chromatičnosti [3]

1.1.2 SVĚTELNÝ TOK

Světelný tok je veličina charakterizující množství světelné energie, kterou zdroj vyžáří za jednotku času, s přihlédnutím na citlivost oka vůči různým vlnovým délkám světla. Značkou je Φ a jednotkou je lumen [lm] [4]. Kvalitní žárovky dosahují 1500 a více lumenů, xenonové výbojky okolo 3000 lm a moderní LED světla i přes 3000 lm [5].

1.1.3 SVÍTIVOST

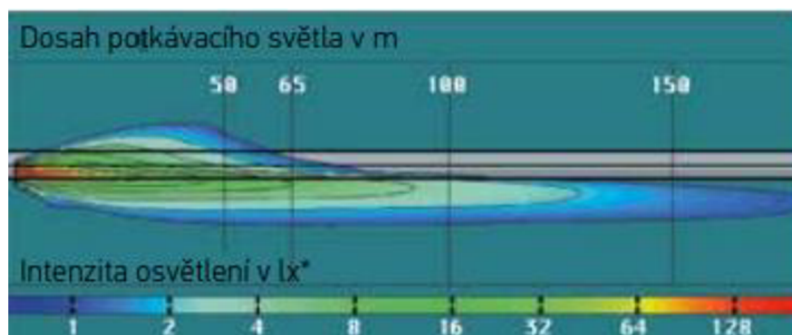
Svítivost udává hustotu světelných paprsků (světelného toku) v daném směru. Značka svítivosti je I a jednotkou je kandela [cd]. Tato hodnota je velmi zásadní u světlometů, jelikož právě světlometry musí svítit velmi silně dopředu a málo do stran.



Obr. 2 Ukázky přípustných hodnot svítivosti pro různá světla automobilů [6]

1.1.4 INTENZITA OSVĚTLENÍ

Intenzita osvětlení je definována jako světelný tok dopadající na jednotku plochy. Značkou je E a jednotkou je lux [lx]. Se zvyšující se vzdáleností od zdroje intenzita klesá.



Obr. 3 Intenzita osvětlení potkávacích světel [6]

1.2 PŘEDNÍ SVĚTLOMETY AUTOMOBILŮ

Moderní přední světlomety obsahují několik druhů světlometů, tedy zařízení sloužících k osvětlení vozovky před vozidlem a svítlen, které slouží k upozornění ostatních účastníků silničního provozu na polohu vozidla, či vůli změnit jeho směr [1]. Dnešní přední světlomety obsahují několik funkcí najednou v jednom kompaktním těle. Obvykle se jedná o světlomet dálkového a potkávacího světla nebo u vyšších řad i corner light neboli světla aktivovaná při zatáčení v rychlostech do 40 km/h a svítlen – směrová světla, přední obrysová světla a denní svícení. Často se spojuje funkce obrysového a směrového světla s funkcí denního svícení, kde je na všechny tyto prvky použit pouze jeden světlovod, na jehož konci jsou různé LED, které se spínají podle požadované funkce.



ŠKODA FABIA
LED PŘEDNÍ SVĚTLOMETY - DETAIL



Zdroj: ŠKODA AUTO

Obr. 4 Složení moderního LED světlometu [7]

1.2.1 HISTORIE

S rozvojem automobilismu v 19. století bylo zapotřebí vyřešit problém s osvětlením automobilů v noci. První vyráběná světla vznikla okolo roku 1880 a jednalo se o plynové svítilny na acetylen (karbidky). První vyráběná vozidla s elektrickými žárovkami vznikla v roce 1904. Halogenové žárovky začaly být používány v šedesátých letech a v určité míře jsou v provozu do dnes, xenony vznikly v roce 1990 a první LED technologie byla aplikována v roce 2004 a dnes absolutně převládá [8].

1.3 DRUHY ZDROJŮ SVĚTLA

V této části budou shrnuty druhy zdrojů světla.

1.3.1 KLASICKÁ ŽÁROVKA

Klasická žárovka funguje na principu rozžhaveného wolframového vlákna na vysokou teplotu pomocí protékajícího elektrického proudu. V dnešní době se kvůli nízké efektivitě nepoužívá.

1.3.2 HALOGENOVÁ ŽÁROVKA

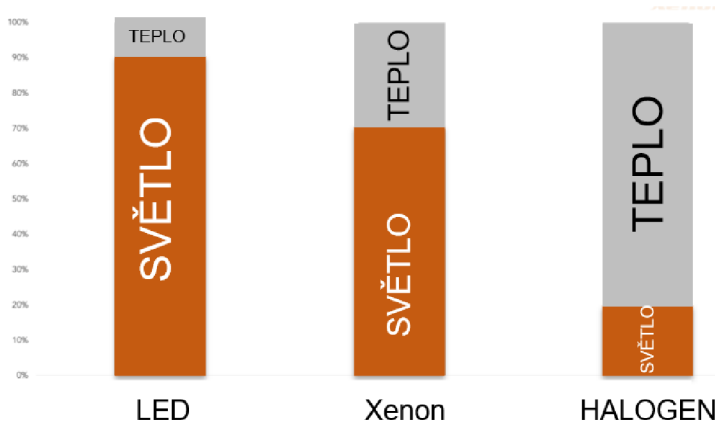
Halogenové žárovky vycházejí ze žárovky klasické s tím rozdílem, že wolframové vlákno je uzavřeno v atmosféře (směs inertního plynu a halogenu). Při svícení se wolfram odpařuje a reaguje s halogenem v atmosféře a vzniká příslušný halogenid wolframu. Z důvodu rozdílné koncentrace difunduje zpět k vláknu, kde se rozpadá na wolfram a volný halogen. Uvolněný wolfram v blízkosti jeho vlákna omezuje jeho vypařování a tím prodlužuje jeho životnost a zvyšuje světelný tok [9]. Tato technologie postupně ustupuje LED světlům.

1.3.3 XENONOVÁ VÝBOJKA

Jedná se o tzv. HID zdroj (High-Intenzity Discharge neboli výboj s vysokou intenzitou). Funguje na principu hořícího elektrického oblouku mezi dvěma wolframovými elektrodami uvnitř trubice, která je naplněna většinou xenonem a dalšími prvky. Chemické složení plynné náplně určuje výslednou barvu plamene. Výbojka je natlakovaná až na 70 barů a je nutné jí zapálit pulsem napětí až 30 kV [10]. Tento způsob osvětlení dosahuje ve všech parametrech lepší hodnoty než halogenové žárovky, výrazně je vylepšena hlavně životnost a světelný tok – 6x delší a 2x více lumenů než u halogenové žárovky [1].

1.3.4 LED

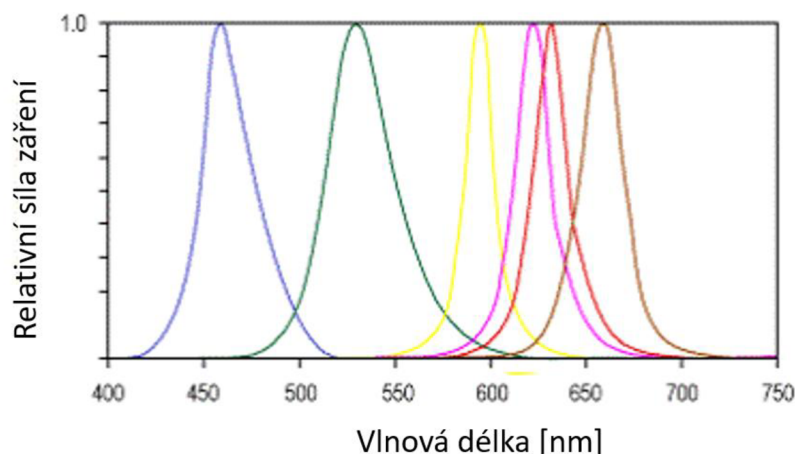
LED neboli Light-Emitting Diode funguje na principu P-N přechodu, kterým prochází stejnosměrný elektrický proud a z důvodu rekombinace páru elektron – díra dochází k uvolnění určitého množství energie. Tato energie se uvolňuje ve formě světla nebo tepla (pokud je energie zachycená krystalovou mřížkou) [11]. LED mají vysokou životnost (až 100 tis hodin), nízkou spotřebu, nízké tepelné ztráty, velmi malou velikost zdroje (i desetin milimetrů) a zásadní výhodou u světla automobilů je tvorba monochromatického světla [12]. LED světla jsou dnes dominantní technologií a jsou montovány i do základních modelů automobilů [13].



Obr. 5 Srovnání efektivity různých zdrojů světla [14]

1.4 TVORBA BÍLÉHO SVĚTLA

V automobilovém průmyslu je žádané bílé světlo, ale LED jsou schopna vyprodukovat pouze monochromatické záření. Mezi konvenční metody patří tvorba pomocí RGB metody nebo pomocí použití luminoforu.



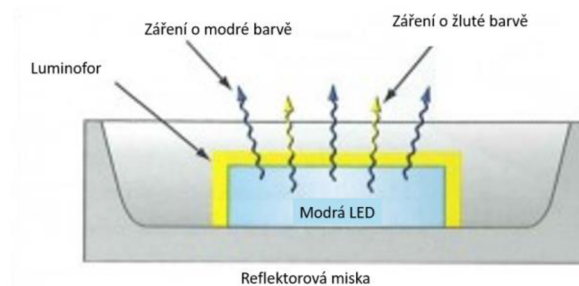
Obr. 6 Spektrální hustota záření různě barevnými LED [15]

1.4.1 RGB

RGB metoda spočívá v použití tří monochromatických LED emitující modrou, zelenou a červenou barvu, jejichž smícháním vzniká bílé světlo. Tímto principem lze získat i jiné barvy pouze na základě principu míchání barev. Problémem této metody je rozdílné teplotní chování LED s různou barvou, složitost systému a nízký výkon [16].

1.4.2 LUMINOFOR

Tato metoda vychází z principu interakce modré LED s vrstvou luminoforu. Část modrého světla projde vrstvou beze změny a část je přeměněna na záření o delší vlnové délce, obvykle o vlnové délce žlutého světla, spojením těchto dvou záření dojde ke vzniku bílého světla [17].



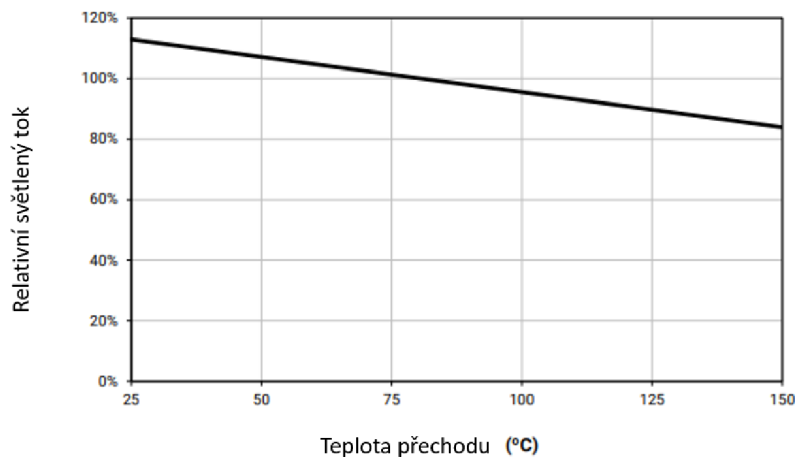
Obr. 7 Schéma tvorby bílého světla pomocí luminoforu [16]

1.5 VLIV TEPLoty NA PARAMETRY LED

V ideálních podmínkách jsou LED schopné přetvořit 80 % elektrické energie na světlo a zbylých 20 % na teplo [18]. Právě těchto 20 % je nutné odvést pryč od LED jinak hrozí změna chování. Při zvyšující se teplotě dochází k vratným i nevratným změnám chování. Mezi vratné změny patří snížení světelného toku nebo snížení napětí a prodloužení vlnové délky vyzařovaného světla [18]. Pokud teplota přesáhne kritickou hodnotu, dochází k nevratnému zničení diody. Tato teplota je obvykle stanovena okolo 150 °C [19]. Se zvyšující se teplotou také klesá životnost.

1.5.1 VLIV NA SVĚTELNÝ TOK

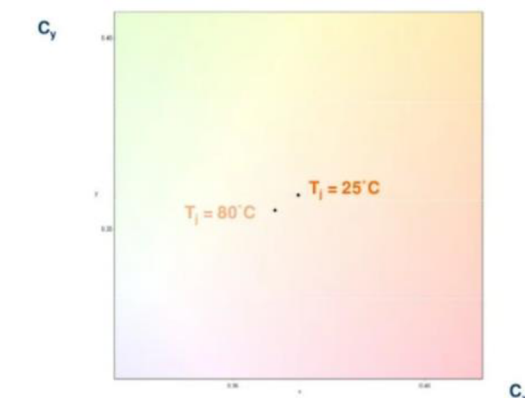
Velikost světelného toku je závislá na proudu protékajícím LED. Se zvyšujícím se proudem se LED více zahřívá [20]. Pokud se zvýší teplota LED, tak se zmenší světelný tok, ale pokud teplota zpátky klesne, světelný tok se vrátí na původní teplotu [19].



Obr. 8 Změna relativního světelného toku v závislosti na teplotě přechodu u LED [19]

1.5.2 VLIV NA ZMĚNU BARVY

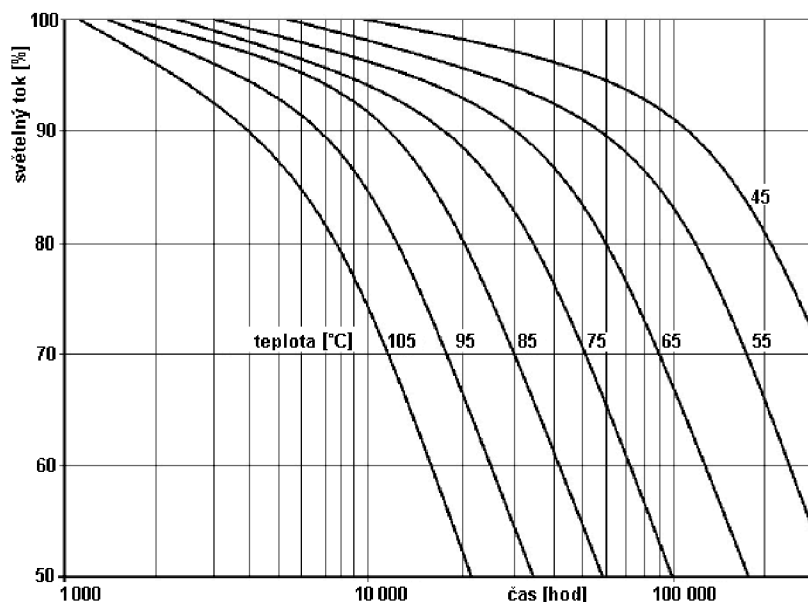
Se zvyšující se teplotou dochází u všech barev LED ke světelnému posuvu. Některé jsou ale více náchylné, a tudíž se celková barva světla přesunuje k složkám, které na ni nejsou tolik citlivé [21]. Jedná se hlavně o modrou složku, tudíž se stoupající teplotou se stává dominantnější [20].



Obr. 9 Změna barvy světla při změně teploty [21]

1.5.3 VLIV NA ŽIVOTNOST

Pokud budou LED dobře chlazeny, může být jejich životnost až 100 000 hod [12]. Avšak se zvyšující se teplotou klesá světelný tok i životnost. Z tohoto důvodu je nutné při dosažení vyšších teplot snížit světelný tok, aby bylo dosaženo stejné životnosti.



Obr. 10 Změna životnosti a světelného toku v závislosti na teplotě [22]

1.6 DRUHY OSVĚTLENÍ V PŘEDNÍCH SVĚTLECH

Dnešní přední světlomety obvykle obsahují:

1.6.1 DÁLKOVÉ SVĚTLOMETY

Dálkové světlomety doplňují oblast potkávacích světel, kde většina světelného toku je směřována do středové části tak, aby světla dosvítila, co nejdále. Tato světla nelze používat v případě přítomnosti protijedoucího vozu, pokud nejsou vybaveny technologií stínování, která zabraňuje jejich oslnění. Ve státech, které používají normu ECE (hlavně Evropská unie) je možné použít světlomety o svítivosti až 140 000 cd a v Kanadě a USA je tato hodnota omezena na 75 000 cd [23].

1.6.2 LASEROVÉ SVĚTLOMETY

Trendem dnešní doby jsou laserové světlomety, které fungují současně se světlomety dálkovými a jsou schopné dosvítit až na 600 m, což je až dvakrát více než u světlometů s technologií LED [24]. Tyto světlomety se zapínají pouze při speciálních podmínkách (rychlost nad 60 km/h a pokud se před vozidlem nenachází žádný objekt) a to je činí v praxi, společně s velmi vysokou cenou, zatím velmi málo používané. V dnešní době jsou používány pouze u nejvyšších modelů značek Audi a BMW [24].

1.6.3 SMĚROVÁ SVĚTLA

Směrová světla slouží k upozornění ostatním účastníkům o vůli změnit směr, nebo pro světelné upozornění na nebezpečí. Mají definovanou barvu světla a frekvenci blikání dle příslušné normy.

1.6.4 OBRYSOVÁ SVĚTLA

Obrysová světla slouží pro zviditelnění auta, například u parkování při špatné viditelnosti. Jsou řešena tak, aby měla co nejmenší spotřebu elektrické energie. V moderních světlech je časté řešení, kdy se pouze ztlumí LED pro denní svícení a slouží takto jako obrysové světlo.

1.6.5 CORNER LIGHT

Corner light jsou světla určená pro dosvětlování do zatáček v nízkých rychlostech. V závislosti na cenové úrovni vozidla jsou buďto řešeny zapínáním spodních mlhovek, nebo u dražších vozidel přímo zabudovaným LED zdrojem na vnitřním okraji světlometu, který slouží pouze k tomuto účelu. Statická světla svítí pod úhlem 35° a dynamická jsou schopna natáčení do různých úhlů natočení [25].

1.6.6 DENNÍ SVÍCENÍ

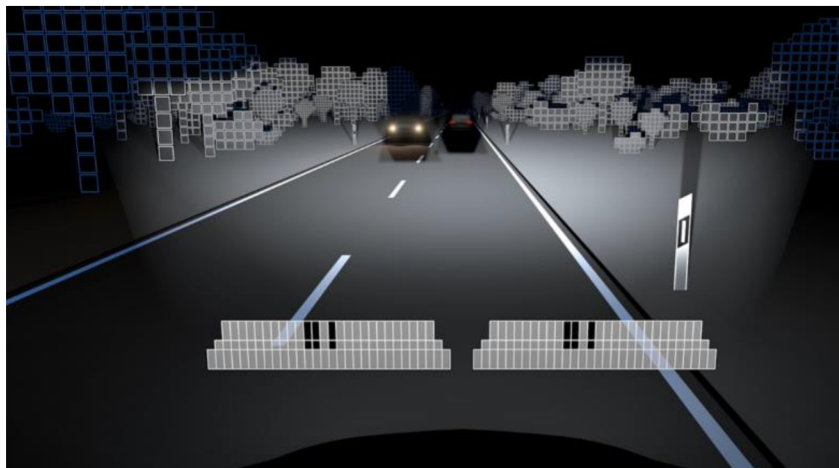
Denní svícení slouží k upozornění ostatním účastníkům provozu na přítomnost vozidla za denního světla, při nesnížené viditelnosti. Jejich výhodou je úspora elektrické energie oproti zapnutým potkávacím světlometům. Z předpisu EHK OSN č. 48 vyplývá, že se denní svítidla při aktivaci směrových světel musí vypnout, nebo se její svítivost musí snížit, je-li vzdálenost mezi denním svícením a směrovým světlem menší než 40 mm. Při jejich použití nemusí svítit obrysová, potkávací ani koncová světla [26].

1.6.7 POTKÁVACÍ SVĚTLOMETY

Potkávací světlometry slouží k distribuci světla v oblasti, která neoslňuje ostatní řidiče. Tato oblast je přesně definována dle legislativy.

1.7 TECHNOLOGIE MATRIX

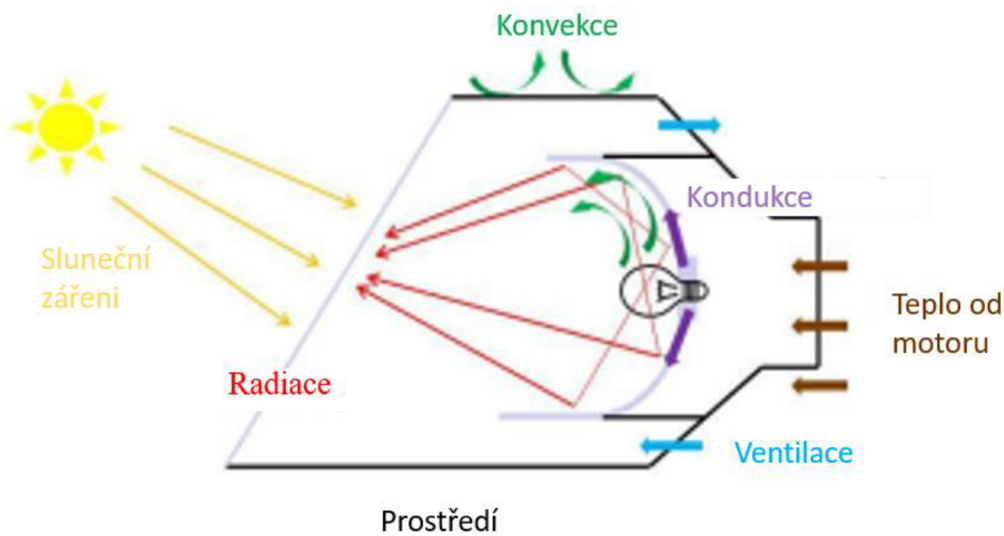
Moduly matrix jsou posledním stupněm vývoje světlometů. Jejich primárním cílem je možnost použití dálkových světel i při přítomnosti protijedoucích vozidel. V praxi je toto řešeno několika LED čipy, které svítí na přesně určenou pozici a spolu s ostatními tvoří mřížku, u které je možné vypnutí jednotlivých segmentů, které by právě svítily, například na protijedoucí vozidlo nebo na značku. Čím více je těchto segmentů, tím menší je oblast, kam světla, v přítomnosti protijedoucího vozu, nesvítí. Obvykle tento modul zastává funkci potkávacích i dálkových světel. Z hlediska výroby je toto řešení velice výhodné, jelikož lze vyrábět pouze jeden modul a montovat ho do více různých světlometů.



Obr. 11 Ukázka stínování protijedoucího vozidla pomocí technologie matrix [27]

2 TEORIE PŘENOSU TEPLA

Světla musí pracovat ve velkém rozsahu teplot, kdy zimní teploty vzduchu mohou dosahovat až k $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ a letní až k $50\text{ }^{\circ}\text{C}$. Tyto vysoké letní teploty společně s teplotou od motoru mohou způsobit teplotu uvnitř světlometu až okolo $60\text{ }^{\circ}\text{C}$. Ve většině případů maximální přípustnou hodnotu udává zákazník. Například pro automobily Škoda je tato hodnota stanovena na $70\text{ }^{\circ}\text{C}$. Při takto vysokých teplotách je povolena určitá ztráta svítivosti v důsledku teplotní závislosti LED zdrojů.

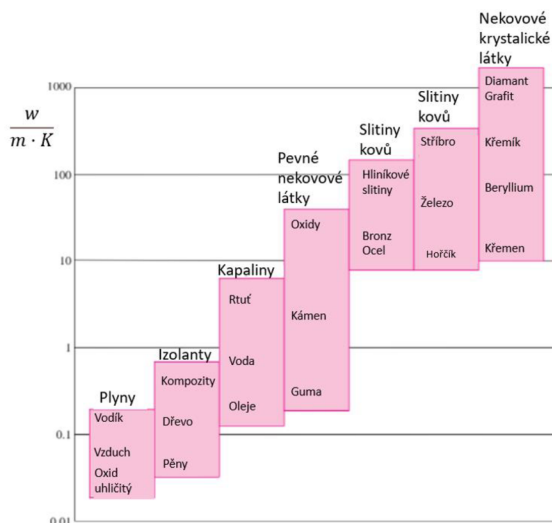


Obr. 12 Různé mechanismy vzniku a přenosu tepla ve světlometu [28]

2.1 VEDENÍ TEPLA

2.1.1 SOUČINITEL TEPELNÉ VODIVOSTI

Tepelná vodivost určuje schopnost látky vést teplo. Je definována jako množství tepla převedené přes jednotku tloušťky materiálu, v normálovém směru plochy, z důvodu změny teploty o jeden Kelvin, v ustáleném stavu [30]. Čím vyšší je tato hodnota, tím lepším vodičem tepla materiál je. Značkou tepelné vodivosti je λ . Se snižujícím se molárním číslem dojde ke snížení tepelné vodivosti [29]. Tepelná vodivost u pevných a kapalných látek závisí jen na teplotě látky a s rostoucí teplotou většinou klesá, u plynů závisí na teplotě i tlaku [31].



Obr. 13 Srovnání součinitelů tepelné vodivosti různých látek [29]

2.1.2 MECHANISMUS VEDENÍ TEPLA

K vedení tepla dochází primárně v pevných látkách, ale vyskytuje se také u plynů a kapalin. Ve vakuu z důvodu nepřítomnosti jakýchkoliv molekul nedochází k vedení tepla. V pevných látkách dochází k vedení tepla dvěma procesy, a to kmitáním jednotlivých atomů v krystalové mřížce a pohybem volných elektronů [29]. Schopnost vést teplo velmi závisí na uspořádání atomů v krystalové mřížce. Čím více jsou atomy v mřížce uspořádané, tím vyšší tepelnou vodivost mají, z tohoto důvodu má nejvyšší známou tepelnou vodivost za pokojové teploty diamant. V kapalinách a plynech je tento jev mnohem méně významný, protože molekuly jsou od sebe velmi vzdálené a šance na jejich srážku je malá, proto je jejich součinitel tepelné vodivosti velmi malý [29]. Tento fakt se využívá například v oknech, kde je mezivrstva vzduchu použita jako izolant.

2.1.3 MATEMATICKÝ POPIS PŘENOSU

Tepelný tok \dot{Q} [W] je definován pomocí Fourierova zákona. Pro trojrozměrné těleso platí, že se teplo šíří ve směru normály izotermy směřující do míst s vyššími teplotami (viz obr. 15) [31]:

$$\dot{Q} = -\lambda \cdot S \cdot \text{grad } T \quad (2.1)$$

Respektive hustota tepelného toku \dot{q} [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$] vztažená na jednotku plochy:

$$\dot{q} = -\lambda \cdot \text{grad } T \quad (2.2)$$

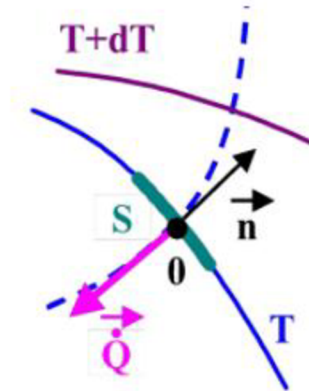
S [m^2] plocha kolmá k tepelnému toku

λ [$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$] součinitel tepelné vodivosti

Vektor $\text{grad } T$ je definován pomocí vztahu:

$$\text{grad } T = \vec{n} \cdot \frac{\partial T}{\partial n} \quad (2.3)$$

\vec{n}	[m]	jednotkový vektor normály k izotermické ploše
T	[K]	termodynamická teplota



Obr. 14 Znáornění směru šíření tepelného toku [31]

2.1.4 DIFERENCIÁLNÍ ROVNICE VEDENÍ TEPLA

Diferenciální rovnice vychází z rozdílu tepla přivedeného a odvedeného. Pomocí Fourierova zákona je vypočítané teplo, které v tělese zůstane. Toto se provede ve všech směrech. Do řešení je nutné také zohlednit výkon vnitřních zdrojů tepla. Následně pomocí prvního zákona termodynamiky je možné odvodit obecnou DR vedení tepla. Pro homogenní tuhé látky a tekutiny s vnitřními zdroji platí [32]:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a \cdot \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \frac{Q^*}{c_p \cdot \rho} \quad (2.4)$$

ρ	[kg · m ⁻³]	hustota
c_p	[J · Kg ⁻¹ · K ⁻¹]	měrná tepelná kapacita látky při konstantním tlaku
τ	[s]	čas
a	[m · s ⁻²]	teplotová vodivost
Q^*	[W · m ⁻³]	výkon vnitřního zdroje tepla

Teplotová vodivost a je definována jako:

$$a = \frac{\lambda}{c_p \cdot \rho} \quad (2.5)$$

2.1.5 POČÁTEČNÍ A OKRAJOVÉ PODMÍNKY

Pro řešení je nutné definovat počáteční podmínky. **Počáteční podmínka** definuje rozložení teplot v prostoru v čase $\tau = 0$ [32].

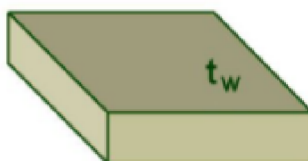
Lze zapsat jako:

$$T(x, y, z, \tau) = f(x, y, z) \quad (2.6)$$

Okrajová podmínka 1. druhu - Dirichletova

Tato podmínka určuje rozložení teplot na povrchu tělesa v určitém čase. Má zápis:

$$T_w = f(x_w, y_w, z_w, \tau) \quad (2.7)$$



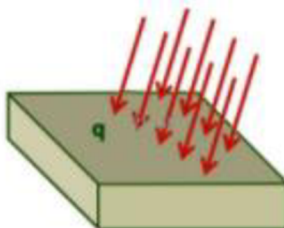
Obr. 15 Grafické znázornění okrajové podmínky 1. druhu [32]

Okrajová podmínka 2. druhu - Neumannova

Tato okrajová podmínka určuje rozložení tepelného toku na povrchu tělesa v čase. Může reprezentovat například dopadající sluneční záření na povrch tělesa.

Matematicky lze zapsat takto:

$$q_w = f(x_w, y_w, z_w, \tau) \quad (2.8)$$



Obr. 16 Grafické znázornění okrajové podmínky 2. druhu [32]

Okrajová podmínka 3. druhu - Newtonova

Tato okrajová podmínka určuje rozložení součinitele přestupu tepla α na povrchu tělesa. Můžeme zapsat jako:

$$\alpha = f(x_w, y_w, z_w, \tau) \quad (2.9)$$

Okrajová podmínka 4. druhu

Tato okrajová podmínka se zabývá stykem dvou těles. Rozlišujeme dokonalý a nedokonalý styk těles. V praxi jsou skoro všechny dotyky nedokonalé, a proto zde dochází k fázové přeměně, tedy změně teploty. Dotyk můžeme zlepšit použitím například teplovodní pasty nebo vyšší kvalitou opracování povrchu.

Rovnice pro dokonalý styk, kde dojde pouze ke změně součinitele λ :

$$-\lambda_1 \cdot \left(\frac{\partial T}{\partial y}\right)_w = -\lambda_2 \cdot \left(\frac{\partial T}{\partial y}\right)_w \quad (2.10)$$

Rovnice pro nedokonalý styk, kde dochází ke změně teploty:

$$\dot{q}_w = \frac{1}{R_K} \cdot (T_{w1} - T_{w2}) \quad (2.11)$$

R_K [m² · K · W⁻¹] konstantní tepelný odpor

Konstantní tepelný odpor R_K je tabelován.

Okrajová podmínka 5. druhu

Tato okrajová podmínka popisuje situaci, kdy dochází k fázové přeměně na povrchu látky.

2.1.6 VEDENÍ TEPLA PŘES ROVINNOU STĚNU

Velmi často se v technické praxi setkáváme s vedením tepla přes rovinnou stěnu, může se například jednat o stěnu domu nebo o rovinný chladič, přes který je vedeno teplo. Tepelný tok rovinnou stěnou lze odvodit pomocí Fourierova zákona nebo pomocí obecné diferenciální rovnice vedení tepla bez vnitřních zdrojů. Odvození pomocí Fourierova zákona:

Předpokládáme stěnu o tloušťce L , součiniteli tepelné vodivosti λ a ploše S . Zabýváme se stacionárním vedením, tedy na povrchu obou stěn je ustálená teplota T_1 a T_2 . Znění Fourierova zákona pro tento děj, lze vyjádřit jako:

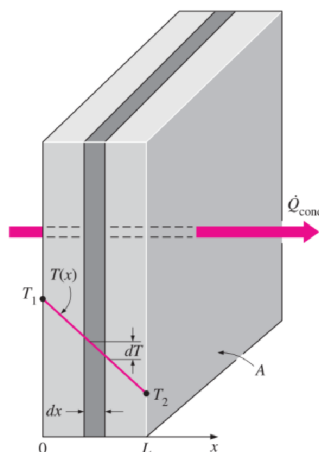
$$\dot{Q}_w = -\lambda \cdot S \cdot \frac{dT}{dx} \quad (2.12)$$

Tepelný tok a plocha stěny jsou konstantní, z toho důvodů je dT/dx také konstantní a tím pádem má teplota uvnitř stěny lineární charakter. Pomocí separace proměnných získáme integrál:

$$\int_{x=0}^{x=L} \dot{Q}_w dx = - \int_{T=T_1}^{T=T_2} \lambda \cdot S dT \quad (2.13)$$

Po integraci a úpravě získáváme:

$$\dot{Q}_w = -\lambda \cdot S \cdot \frac{T_2 - T_1}{L} \quad (2.14)$$



Obr. 17 Znáornění lineárního průběhu teploty u vedení tepla ve stěně [29]

Dále lze zavést jednotku tepelný odpor vedením R_λ [$K \cdot m^2 \cdot W^{-1}$], který je definován jako:

$$R_\lambda = \frac{L}{\lambda} \quad (2.15)$$

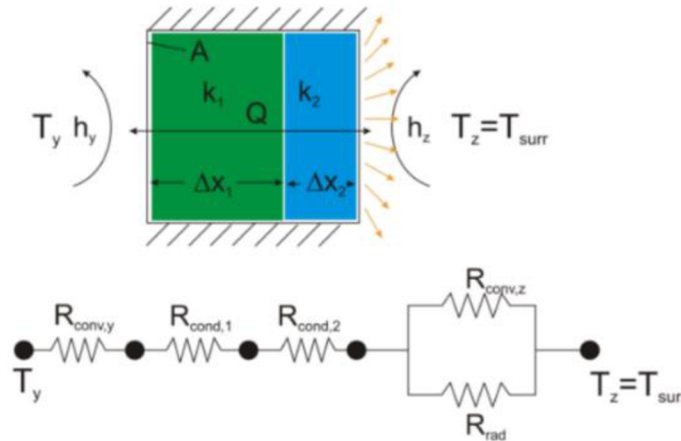
Rovnici lze dále zjednodušit:

$$\dot{Q}_w = -S \cdot \frac{T_2 - T_1}{R_\lambda} \quad (2.16)$$

2.1.7 ANALOGIE K ELEKTRICKÉMU PROUDU

Mezi elektrickým proudem a tepelným tokem lze vidět určitou analogii. Elektrický proud odpovídá hustotě tepelného toku, rozdíl napětí rozdílu teplot a elektrický odpor odporu tepelnému.

Díky tomuto poznatku je možné řešit složitější úlohy a můžeme zapojovat tepelné odpory do sériových i paralelních obvodů. Sériové zapojení může představovat stěnu složenou s více materiálů a paralelní například, kdy se ze stěny odvádí teplo zároveň radiací a konvekcí.



Obr. 18 Přirovnání přenosu tepla vedením k elektrickému proudu [33]

2.1.8 PROSTUP SLOŽENOU ZDÍ

Ze znalosti analogie s elektrickým proudem víme, že můžeme jednotlivé odpory mezi sebou násobit, abychom získali celkový tepelný odpor zdi. Rovnici lze upravit na:

$$\dot{Q}_w = -S \cdot \frac{T_{n+1} - T_1}{\sum_{i=1}^n R_{\lambda i}} \quad (2.17)$$

2.2 KONVEKCE

2.2.1 SOUČINITEL PŘESTUPU TEPLA

Součinitel přestupu tepla α [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$] je definován jako míra přenosu tepla mezi povrchem pevné látky a tekutinou, vztažené na jednotku plochy, při změně o jednotku teploty [29]. Čím je toto číslo vyšší, tím dochází k vyšší míře přenosu tepla. Tato veličina je velmi závislá na několika parametrech, a to především na rychlosti obtékání. Tento parametr se dá obecně určit pomocí diferenciálních rovnic, tvaru mezní vrstvy, experimentu nebo velmi často také pomocí teorie podobnosti. Obecně dosahuje vyšších hodnot při turbulentním proudění.

Tabulka 1 Příklady součinitelů přestupu tepla pro různé tekutiny při různém mechanismus [29]

Součinitel přestupu tepla α [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$]	
Naturální konvekce	
plyny	3 - 20
voda	100 - 600
vařící voda	1 000-20 000
Nucená konvekce	
plyny	10 - 200
oleje	50 - 500
voda	500 - 20 000

2.2.2 MECHANISMUS KONVEKCE

Konvekce vzniká pouze u kapalin a plynů. Konvekci dělíme na přirozenou, která vznikne důsledkem rozdílů teplot a na nucenou, která vzniká během proudění v důsledku působení vnějších sil (ventilátor atd.) [34]. Narozdíl od vedení tepla, je zde nutný hromadný objemový pohyb tekutiny. Při proudění tekutiny okolo pevného tělesa dochází ke vzniku tzv. mezní vrstvy, která se nachází v úplné blízkosti pevného tělesa a její rychlost proudění se postupně snižuje až je teoreticky na povrchu rovna nule [35].

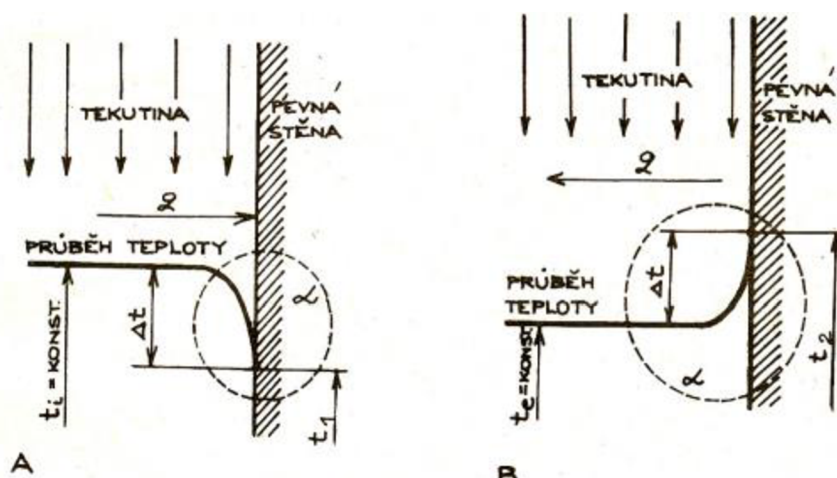
V této mezní vrstvě dochází k přestupu tepla mezi tekutinou a zdí. Při laminárním prouděním je zde určitý odpor proti průchodu tepla, při turbulentním je zde téměř zanedbatelný [34].

Tepečný tok při přestupu tepla nám popisuje Newtonův vztah:

$$\dot{Q} = \alpha \cdot S \cdot (T_w - T_\infty) \quad (2.18)$$

T_w [K] povrchová teplota obtékaného tělesa

T_∞ [K] teplota tekutiny ve velké vzdálenosti od obtékaného tělesa



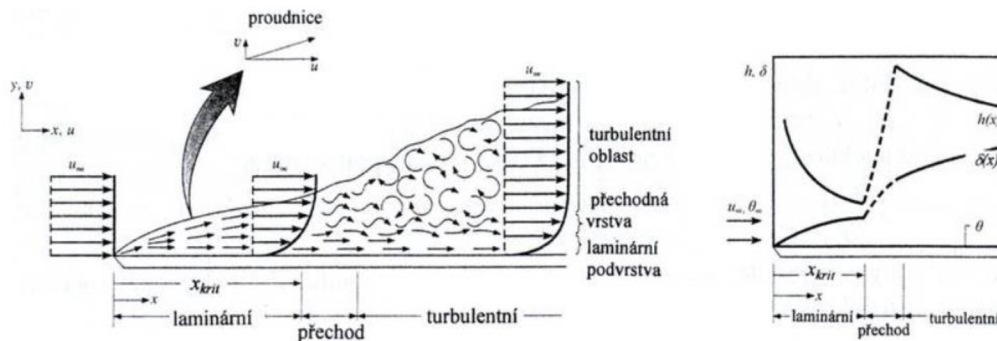
Obr. 19 Znáornění průběhu teploty v blízkosti povrchu [34]

Můžeme zavést jednotku tepelný odpor konvekci R_α [$\text{K} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{W}^{-1}$], který je definován jako:

$$R_\alpha = \frac{L}{\alpha} \quad (2.19)$$

2.2.3 LAMINÁRNÍ A TURBULENTNÍ PROUDĚNÍ

Celkově rozlišujeme tři druhy proudění, a to konkrétně laminární, turbulentní a přechodné. U všech tří druhů existuje laminární vrstva u povrchu obtékaného tělesa. Laminární proudění je charakteristické vysoce organizovaným pohybem jednotlivých vrstev tekutiny, naopak vysoce chaotické proudění, při kterém dochází k promíchání jednotlivých vrstev a vzniku vírů, se nazývá turbulentní [36]. V technické praxi se většinou vyskytuje turbulentní. O druhu proudění rozhoduje tzv. Reynoldsovo číslo. Pokud je vypočítané Reynoldsovo číslo větší než experimentálně zjištěné kritické Reynoldsovo číslo, dochází k turbulentnímu proudění a pokud je menší, dochází k laminárnímu.



Obr. 20 Mezní vrstvy pro různé režimy proudění [37]

2.2.4 TEORIE PODOBNOSTI

Teorie podobnosti říká, že pokud existuje několik různých, ale navzájem podobných systémů, tak je lze na základě znalosti jednoho z nich popsat ostatní, a to pomocí vhodných definic [38]. Aby se teorie podobnosti mohla použít musí systémy splňovat určitá kritéria, kterými jsou různá podobnostní čísla. Pokud mají systémy stejnou hodnotu určitého podobnostního čísla, jsou si podobné. Této teorii lze využít například při měření proudění okolo letadla nebo dvou za sebou jedoucích vozidel, kdy lze za specifických podmínek použít model v určitém měřítku, místo vozidla v životní velikosti. Pomocí podobnosti lze také získat součinitel prostupu tepla α . Dále budou probírána zásadní podobnostní čísla pro výpočet α .

2.2.5 PODOBNOSTNÍ ČÍSLA

Reynoldsovo číslo

Reynolds zjistil, že režim proudění (turbulentní, laminární) záleží hlavně na poměru setrvačných a viskózních sil v kapalině [29]. Na základě tohoto zjištění definoval bezrozměrné Reynoldsovo číslo:

$$Re = \frac{\omega \cdot L}{\nu} \quad (2.20)$$

ω	[m · s ⁻¹]	rychlost proudění
L	[m]	charakteristický rozměr
ν	[m ² · s ⁻¹]	kinematická viskozita

Pokud Reynoldsovo číslo vzroste natolik, že se proud stává turbulentním, nazýváme toto číslo kritickým Reynoldsovým číslem. Je závislé na geometrii a dalších parametrech. Například u trubky bylo stanoveno, že pokud je menší než 2300, je proudění laminární a pokud je větší jak 4000, tak je turbulentní. Mezi tímto intervalem je proudění smíšené [39].

Prandtlovo číslo

Prandtlovo číslo je měřítkem podobnosti rychlostních a teplotních polí [40]. Obsahuje jen vlastnosti dané látky, proto je často tabelováno.

Je definováno jako:

$$Pr = \frac{\nu}{a} \quad (2.21)$$

Tabulka 2 Typické hodnoty Prandtlova čísla [29]

Tekutiny	Prandtlovo číslo [-]
Tekuté kovy	0,004 - 0,03
Plyny	0,12 - 1
Voda	1,12 - 13,7
Organické kapaliny	5 - 50
Oleje	50 - 100 000
Glycerin	2000 - 100 000

Nusseltovo číslo

Nusseltovo číslo dává do souvislosti zvýšení přenosu tepla přes vrstvu tekutiny v důsledku konvekce, vzhledem ke kondukcí přes stejnou vrstvu tekutiny. Čím je větší, tím efektivnější je konvekce [29].

$$Nu = \frac{\alpha \cdot L}{\lambda} \quad (2.22)$$

2.2.6 KRITERIÁLNÍ ROVNICE

Na základě zkušeností byla odvozena empirická kritériální rovnice, pomocí které lze vypočítat součinitel α v podobné geometrii při nucené konvekci:

$$Nu = C \cdot Re^m \cdot Pr^n \quad (2.23)$$

Konstanty C , m a n lze pro stejnou tekutinu najít v tabulkách. Součinitel α nalezneme tak, že po vyřešení této rovnice vyjádříme a vypočítáme α z definičního vztahu pro Nusseltovo číslo.

2.3 ZÁŘENÍ

2.3.1 MECHANISMUS

Vše, co má teplotu vyšší než nula stupňů Kelvina, vyzařuje energii ve formě elektromagnetické záření [41]. Záření, na rozdíl od konvekce i vedení tepla, nepotřebuje přítomnost pevné látky ani tekutiny, a proto přenáší energii i ve vakuu. Aby bylo odlišeno od ostatních druhů elektromagnetických záření, které vznikají jinými způsoby, je nazýváno tepelným zářením. Má vlnovou délku od 0,1 do 100 μm [29]. Se zvyšující se teplotou se zvedá množství emitované energie. K přenosu zářením dochází dvěma principy – elektromagnetickou emisí a absorpcí. K emisi dojde, když atom (resp. molekula) přejde ze stavu s vyšší energií do stavu s nižší energií. Při tomto jevu dojde k vyzáření energie ve formě fotonu o určité frekvenci. Jednotlivé atomy vyzařují fotony o různé fázi, a tak vzniká elektromagnetické záření. Absorpce je děj opačný, při kterém atom pohltí foton a přejde z nižšího do vyššího stavu [42].

2.3.2 EMISIVITA POVRCHU

Emisivita povrchu (česky poměrná zářivost) reprezentuje množství tepla vyzářeného z plochy, při určité teplotě vzhledem k množství tepla, které by při stejné teplotě vyzářilo černé těleso. Je to bezrozměrná veličina se značkou ε . Černé těleso ($\varepsilon = 1$) je definováno jako dokonalý zářič a zároveň dokonalý pohlcovač energie, opakem černého tělesa je těleso bílé ($\varepsilon = 0$) [42]. Téměř dokonalým černým tělesem je slunce [43]. V realitě není emisivita konstantní a záleží na materiálu, teplotě a struktuře povrchu nebo i směru vyzařování. Tělesa s konstantní emisivitou nazýváme šedá tělesa [42].

Tabulka 3 Emisivita vybraných látek [44]

Povrch	ε [-]
Hliníková fólie	0,05
Nerezový plech	0,15
Hliník, zoxidovaný	0,25
Ocel, zoxidovaná	0,3
Hliníko-zinkový plech	0,4
Mosaz, zoxidovaná	0,5

Bílý nátěr	0,85
PVC	0,9
Černý nátěr	0,92
Mínerální vata	0,94

2.3.3 KIRCHHOFFOVY ZÁKONY

1. Kirchhoffův zákon

Pokud dopadne záření na povrch, tak se část odrazí, pohltí a část také projde. Toto nám popisuje 1. Kirchhoffův zákon, který má tvar:

$$A + R + T = 1 \quad (2.24)$$

A [–] absorptance

R [–] reflektance

T [–] transmitance

Pokud $A = 1$ jedná se o černé těleso, $R = 1$ je dokonalé bílé těleso a $T = 1$ je dokonalé transmisivní těleso [43].

2. Kirchhoffův zákon

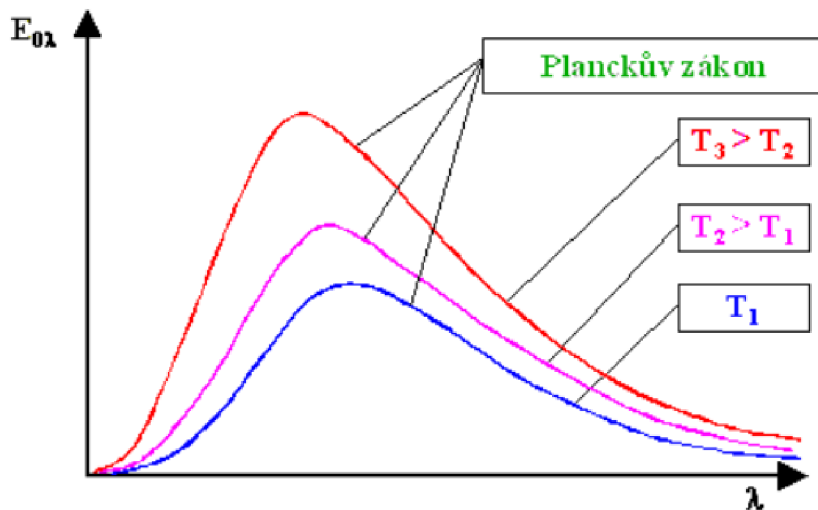
Druhý Kirchhoffův zákon říká, že těleso je stejně dokonalý zářič, jako je dokonalý pohlcovač záření. Z toho vyplývá, že emisivita se rovná absorptanci [43].

2.3.4 MATEMATICKÝ POPIS PŘENOSU

Záření lze nejlépe popsat pomocí několika zákonů, které společně dokonale popisují záření:

Planckův vyzařovací zákon

Jeho podstatou je zjištění, že tepelné záření může být vyzařováno nebo pohlcováno pouze po kvantech energie. Pomocí tohoto zákona lze odvodit vztah pro spektrální hustotu zářivého výkonu pro černé těleso $E_{0\lambda}$, která je funkcí vlnové délky záření a teploty zářiče [45].



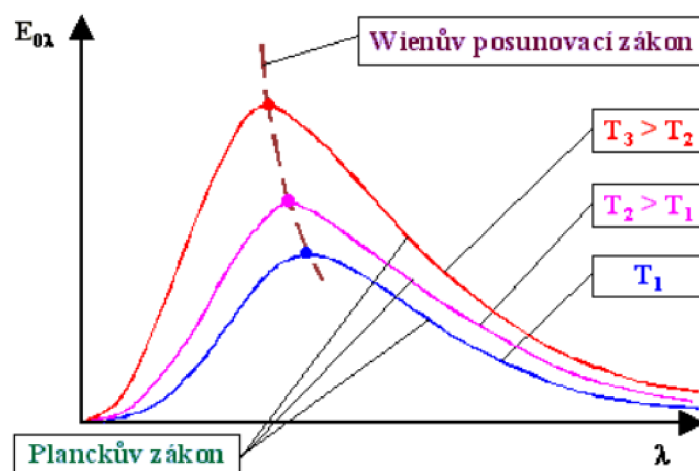
Obr. 21 Grafická interpretace Planckova vyzařovacího zákona [45]

Wienův posunovací zákon

Zákon se zabývá změnou spektrální hustoty záření. Se zvyšující se teplotou se maximální hodnota spektrální hustoty posouvá k nižším vlnovým délkám. Matematická formulace je dána vztahem [46]:

$$\lambda_{\max} \cdot T = 2,8978 \cdot 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{K} \quad (2.25)$$

λ_{\max} [m] vlnová délka, kdy je hodnota spektrální hustoty maximální



Obr. 22 Grafická interpretace Wienova posunovacího zákona [47]

Stefan-Boltzmannův zákon

Tento zákon popisuje množství energie E_0 [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$], kterou vyzáří černé těleso za jednotku času a na jednotku jeho plochy. Lze ho zapsat jako:

$$E_0 = \sigma_0 \cdot T^4 \quad (2.26)$$

σ_0 [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$] Stefanova – Boltzmannova konstanta

Hodnota Stefan – Boltzmannovy konstanty je $5,669 \cdot 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$. Pokud dosáhne záření povrchu tělesa a úplně přemění energii záření na energii tepelnou, tak lze definovat vlastní hustotu tepelného toku \dot{q}_0 [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$] černého tělesa jako [43]:

$$\dot{q}_0 = \sigma_0 \cdot T^4 \quad (2.27)$$

A pokud se jedná o nedokonalý zářič - šedé těleso, má rovnice pro hustotu tepelného toku tvar:

$$\dot{q} = \sigma_0 \cdot \varepsilon \cdot T^4 \quad (2.28)$$

Lze ho získat z Planckova zákona pomocí integrace spektrální hustoty zářivého toku černého tělesa přes celý rozsah vlnových délek, a to za konstantní teploty [43].

2.3.5 ZÁŘENÍ MALÉHO POVRCHU VE VELKÉM PROSTORU, KTERÝ JEJ OBKLOPUJE

Pokud jsou dvě tělesa, které se obklopují (například chladič uvnitř pouzdra světloometu) lze použít upravený vztah pro tepelný tok záření mezi nimi \dot{Q}_{12} [W] [29]:

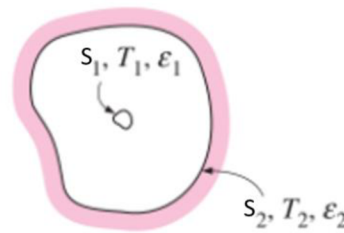
$$\dot{Q}_{12} = S_1 \cdot \sigma_0 \cdot \varepsilon_{12} \cdot (T_1^4 - T_2^4) \quad (2.29)$$

S_1 [m^2] plocha obkloповaného tělesa
 ε_{12} [–] součinitel vzájemné emisivity
 T_1 [K] teplota teplejšího tělesa, který je obkloповán
 T_2 [K] teplota tělesa, který obkloповuje menší těleso

Součinitel vzájemné emisivity lze vypočítat ze vztahu:

$$\varepsilon_{12} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{S_1}{S_2} \cdot \left(\frac{1}{\varepsilon_2} - 1\right)} \quad (2.30)$$

S_2 [m²] plocha tělesa, který obklopuje



Obr. 23 Znáornění záření malého tělesa obklopeného druhým [29]

Pokud lze považovat povrch S_1 o hodně menší než povrch S_2 , potom lze uvažovat, že $\frac{S_1}{S_2} \approx 0$ a můžeme rovnici 2.30 upravit na:

$$\varepsilon_{12} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{S_1}{S_2} \cdot \left(\frac{1}{\varepsilon_2} - 1\right)} \approx \varepsilon_1 \quad (2.31)$$

Rovnice pro tepelné záření bude v tomto speciálním případě:

$$\dot{Q}_{12} = S_1 \cdot \sigma_0 \cdot \varepsilon_1 \cdot (T_1^4 - T_2^4) \quad (2.32)$$

2.3.6 TEPelný ODPOR ZÁŘENÍM

Také zde lze definovat tepelný odpor mezi dvěma tělesy. Pokud se řeší případ, kdy nám malé těleso obklopuje velké, tak se tepelný odpor zjednoduší na:

$$R_1 = \frac{1}{S_1 \cdot \varepsilon_1} \quad (2.33)$$

Tento vztah však platí jen a pouze pro obklopení malého tělesa větším, pokud bychom řešili jiný příklad, musíme brát v potaz rozdílné emisivity povrchů a také úhlový součinitel, tedy veličiny vyjadřující, jak velká část záření jednoho tělesa dopadá na těleso druhé.

3 TEPLOTNÍ MANAGEMENT SVĚTLOMETU

3.1 PŘÍČINY VZNIKU TEPLA

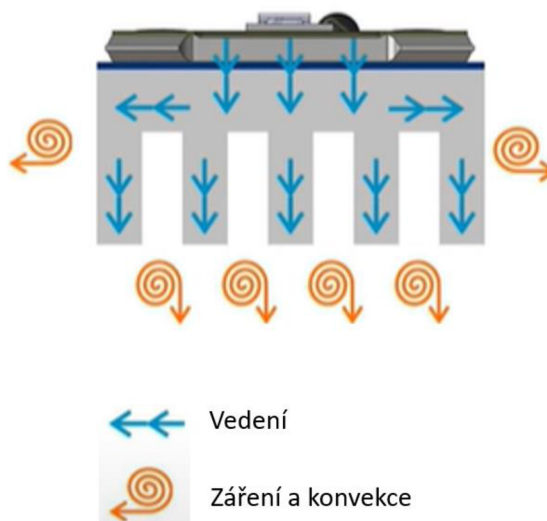
Z důvodu vysokého výkonu moderních světlometů se tvoří velké množství tepla. Toto teplo vzniká primárně kvůli LED čipům, které přibližně 20 % svého výkonu přemění na teplo. Klasická žárovka přemění na teplo až 73 % svého výkonu [18]. Velmi velkým zdrojem tepla je také řídicí elektronika, která však většinou není umístěna uvnitř vlastního těla světlometu, a proto nepředstavuje pro chlazení takový problém.

Významným zdrojem je také teplo od motoru a sluneční záření dopadající na sklo světlometu. Tyto dva faktory vysoce záleží na venkovním počasí a druhu pohonu vozidla, například dnešní elektromotory produkují jen zanedbatelné množství tepla oproti spalovacím motorům [48]. Tato bakalářská práce bude považovat za hlavní zdroj tepla LED čipy a ostatní faktory budou v rámci zjednodušení zanedbány.

Aby LED čip fungoval správně, je nutná optimální teplota. Touto hodnotou je obvykle uvažována tzv. mezní teplota, která je obvykle okolo 90 °C, při které dochází k bezporuchovému provozu a zároveň jsou náklady na chlazení přiměřené [49]. Je dosažena pomocí chlazení – aktivního nebo pasivního.

3.2 PASIVNÍ CHLAZENÍ

Pasivní chlazení využívá přirozenou konvekci, kdy z důvodu rozdílu teplot proudí chladičem vzduch. Tento systém je méně efektivní, ale ekonomicky méně nákladný [50]. Nejčastěji je řešen pomocí chladiče, který odvádí teplo z chlazené součásti.



Obr. 24 Znárodnění vedení, záření a konvekce na chladiči [51]

3.3 AKTIVNÍ CHLAZENÍ

Aktivní chlazení využívá nucenou konvekci. Ta je obvykle vyvozena větráčkem, který fouká vzduch na chladič a tím výrazně zvyšuje součinitel přestupu tepla α [29]. Používá se u vysoce výkonných zdrojů tepla (ve světlometech se používají pro chlazení dálkových světel nebo modulů matrix) nebo také v místech s vysokými nároky na zástavbový prostor z důvodů menších rozměrů chladičů. V extrémních případech lze využít vodní chlazení nebo chlazení pomocí klimatizací [52], to se však u světlometů nepoužívá.

3.4 CHLADIČE

Chladič je zařízení, které je konstruováno tak, aby bylo schopné absorbovat a disipovat velké množství tepla [53]. Potřebná plocha chladiče závisí na mnoha faktorech, jako je množství tepla, kterou musí chladič uchládit, materiálu nebo i barvě. Nejčastěji používanými materiály jsou slitiny hliníku.

3.4.1 MATERIÁLY CHLADIČŮ

V automobilových světlech převládá používání chladičů z hliníku. Hliník vyniká velmi nízkou hustotou a poměrně dobrou tepelnou vodivostí [54]. V případě, že se chladič vyrábí metodou protlačování nebo ohýbání, tak se používá čistý hliník, který obsahuje pouze nepatrné množství nečistot (do 0,5 %). Na odlévání se používají převážně slitiny hliníku s mědí a křemíkem. Samotný hliník má totiž poměrně malou pevnost, která je však podpořena křemíkem a mědí, které pevnost zlepšují. Křemík zlepšuje také korozivzdornost, avšak měď ji zase naopak zhoršuje [55]. Tato slitina se také velmi hodí kvůli nízké teplotní roztažnosti [55]. Méně častěji se používají slitiny hořčíku nebo mědi. Do praxe se také dostalo řešení pomocí chladiče z plastu, který v sobě obsahuje kovové částičky podporující jeho vodivost.

3.4.2 METODY VÝROBY CHLADIČŮ

Odlévání

Obvykle se jedná o tlakové lití, kdy se tavenina vstříkuje vysokou rychlostí a pod vysokým tlakem do formy, často se takto odleje několik chladičů najednou. Z důvodu vysoké ceny formy se tato technologie používá pro velké série [56]. Občas nastává problém s dodržением požadovaných geometrických tolerancí a odlitky se poté dodatečně obrábět.

Protlačování

Protlačovaný chladič vyniká svými mechanickými vlastnosti, jeho nevýhoda je však poměrně vysoká cena. Vzniká tak, že se na polotovar (obvykle zahřátý) působí vysokým tlakem, který způsobí deformaci do formy. Chladič se často musí dále obrábět.

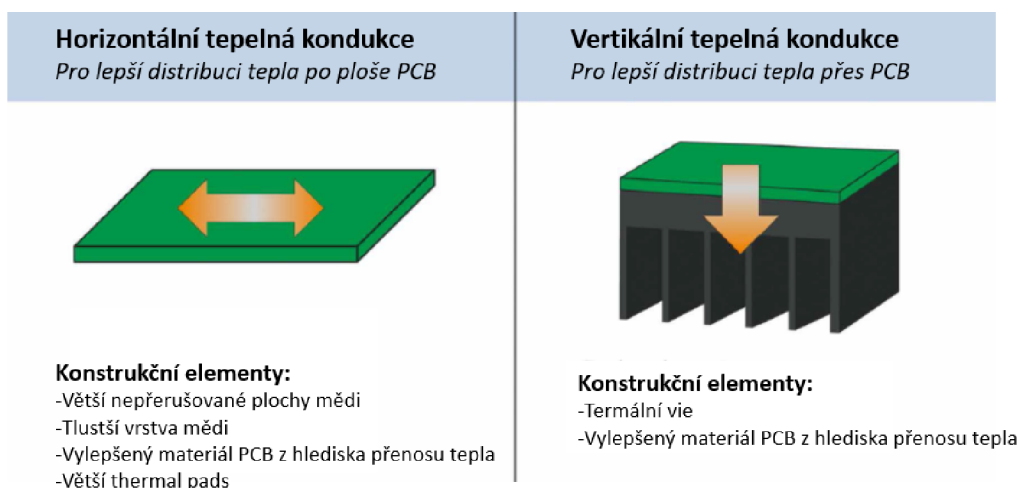
Ohýbání

Ohýbání je nejlevnější způsob výroby chladičů, které se vyrábí z plechů a nejprve se stříhají na požadovaný tvar a následně ohýbají. Často se vyrábí zvláště vystřížená základní deska a žebra z pozohýbaného plechu. Na závěr se tyto prvky spojují pomocí nýtů.

3.5 PCB

Deska plošných spojů (v angličtině Printed Circuit Board zkráceně PCB) je izolovaná deska s vodivými cestami, otvory a ploškami, sloužící k připevnění součástek. Skládá se z několika vrstev, které mají rozdílnou vodivost a funkci [57]. Právě na tuto desku jsou osázeny LED čipy. Existují různé druhy desek, které mají rozdílné teplovodivé vlastnosti, ale i cenu. V automobilním průmyslu se používají 2 typy, a to FR4 a IMS.

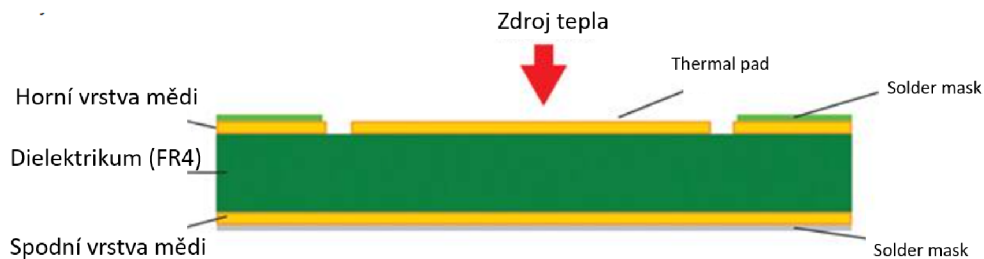
Při návrhu PCB je nutné brát také v potaz, jakým způsobem chceme PCB chladit. Zda chceme navrhnout větší PCB, kde se teplo rozloží po těle samotné desky, nebo pomocí přídavného chladiče, kdy se snažíme teplo co nejvíce efektivně přenést přes desku do chladiče.



Obr. 25 Srovnání různých konstrukčních řešení PCB [58]

3.5.1 FR4

Desky vyrobené z materiálu FR4 jsou nejlevnějším řešením a jsou schopné mít osázené součástky z obou stran. Skládají se z velmi malé vrstvy mědi (0,35 až 0,7 μm), vrstvy FR4 (obvykle 1 až 3 mm) a malé ochranné vrstvy (solder mask) sloužící jako ochrana proti korozi a mechanickému poškození. Tato vrstva se nanáší po celém povrchu s výjimkou míst, kde jsou připevněny součástky, které se pájí většinou pomocí cínu nebo zlata. Materiál FR4 zde slouží jako elektrický izolant a také jako nosný prvek celé desky.

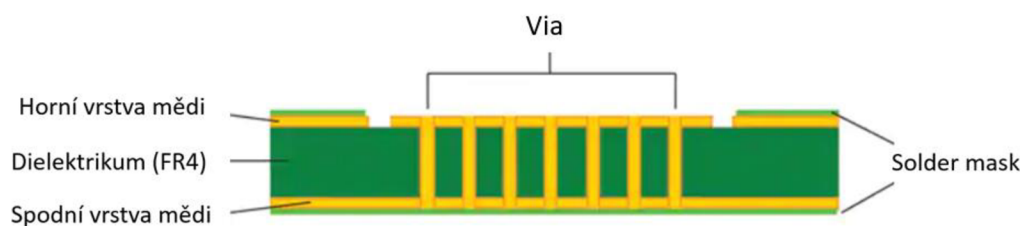


Obr. 26 PCB FR4 [59]

Tato deska má nejhorší tepelné vlastnosti ze všech používaných desek, používá se proto jen pro velmi slabé LED, a to z důvodu velmi nízké tepelné vodivosti materiálu FR4 ($\lambda = 0,25 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$). Pokud by byl umístěn velký zdroj tepla na thermal pad (tedy plošku sloužící k odvodu tepla z LED), tak by sice výborně vodící vrstva mědi teplo částečně rozvedla do okolí, ale kvůli nízké tloušťce, by většina tepla zůstala těsně pod deskou v materiálu FR4. V praxi se tomuto jevu říká hotspot a může vést až ke zničení LED z důvodu vysoké teploty. Abychom tomuto předešli, můžeme použít některé z následujících vylepšení, které tepelné vlastnosti desky výrazně zlepšují.

PTH (Platned Through Holes) via

Via, tedy úprava desky sloužící k lepšímu odvodu tepla z horní strany desky do spodní, kde je obvykle chladič. Zkratka PTH znamená, že via jsou vyráběny pomocí děr, na jejichž povrch se následně nanese vrstva mědi. Via se dávají pouze do oblastí, které obsahují určité výrazné zdroje tepla. Nevýhodou této technologie je nemožnost umístit via přímo pod součástku, protože by pod sebou poté měla díru vyplněnou vzduchem, což je velmi dobrý izolant. Via mají obvykle průměr 0,3 mm a vrstva mědi má jen okolo 30 μm .

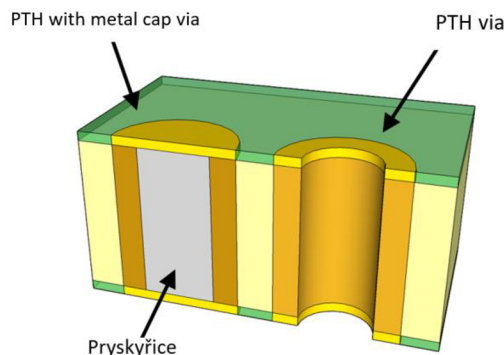


Obr. 27 PCB FR4 + PTH via [59]

PTH with metal cap via

Tento způsob výroby se liší tím, že se via po vyhloubení díry a nanášení mědi vyplní pryskyřicí, obvykle s dobrou tepelnou vodivostí, jejíž hlavní účel není zlepšovat tepelné parametry, ale především vyplnit prázdný prostor. Poté se může na vyplněný prostor nanést

shora i zespodu měď. Díky tomu můžeme součástky umísťovat přímo na via a tím zlepšit odvod tepla.



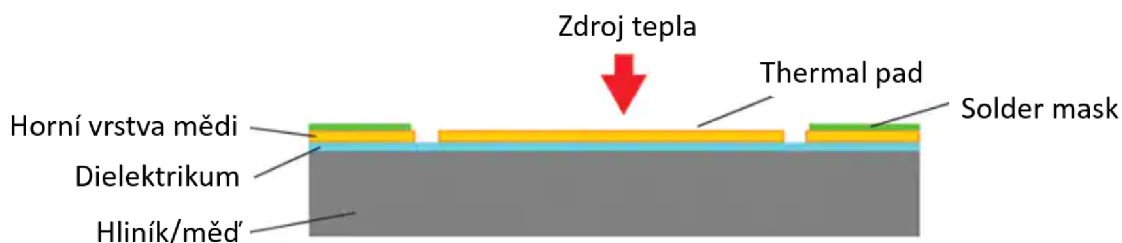
Obr. 28 PCB FR4 + PTH with metal cap via [60]

Destička z mědi

Ve velmi náročných technických aplikacích je možné vyříznout část desky FR4 a místo ní umístit destičku mědi. Tím získáváme výborný přenos tepla z horní na spodní část desky.

3.5.2 IMS

Desky z materiálu IMS jsou používány pro desky s velmi silnými zdroji tepla. Obvykle se používá u desek pro denní svícení. Skládá se z hliníkového nebo měděného těla o tloušťce přibližně 1,5 mm [59], malé vrstvy dielektrika, které slouží k elektrickému oddělení jednotlivých vrstev, a vrstvy mědi a ochranného povrchu (solder mask) stejně jako u desek FR4. Zásadní výhodou jsou výborné tepelné vlastnosti (zvláště u varianty, kdy je spodní vrstva tvořená mědí), jelikož nedochází ke vzniku hotspotu. Má také lepší mechanické vlastnosti.



Obr. 29 PCB IMS [59]

Problémem často bývá rozdílná teplotní roztažnost mědi a hliníku, kdy by kvůli rozdílnému protažení, mohlo dojít k ohybu a popraskání úzké vrstvy mědi. Další nevýhodou je vyšší cena a možnost osadit součástky pouze z jedné strany. Stejně jako u desky z FR4 lze dále vylepšit tepelné vlastnosti pomocí určitých úprav.

Via

Via lze použít jen pokud použijeme měděnou spodní desku, protože pokud by byly použity via u hliníkové desky, tak by při vodivém spojení pomocí via došlo z důvodu rozdílné elektronegativity ke vzniku elektrochemického článku a následné korozi. V případě desek IMS se používají menší via, tzv. mikrovia, které mají průměr jen 0,125 mm (klasické 0,4 mm) a jsou zcela vyplněny mědí. Takže je možné umístit součástky přímo na ně.

Destička z mědi

Stejným způsobem jako u desek z FR4 lze i u IMS použít měděnou destičku vloženou do desky.

3.6 TEPelný ODPOR LED

Každá LED má určitý tepelný odpor, je to z toho důvodu, že zdroj tepla a světla, tedy PN přechod, je umístěn v horní části samotné elektrické součástky, která je nazývána LED čip, a teplo je odváděno na její spodní straně. Tyto odpory jsou přímo vztaženy na velikost LED čipu, a proto je jednotkou $[K \cdot W^{-1}]$. V tomto případě je reálný tepelný odpor LED čipu $R_{LED-real}$ definován jako [61]:

$$R_{LED-real} = \frac{T_j - T_s}{P_{el} - P_{opt}} \quad (3.1)$$

T_j	[K]	Teplota na PN přechodu
T_s	[K]	Teplota na spodní straně desky (v místě dotyku s PCB)
P_{el}	[W]	Elektrický výkon dodávaný do LED
P_{opt}	[W]	Optický výkon dodávaný z LED

Tedy:

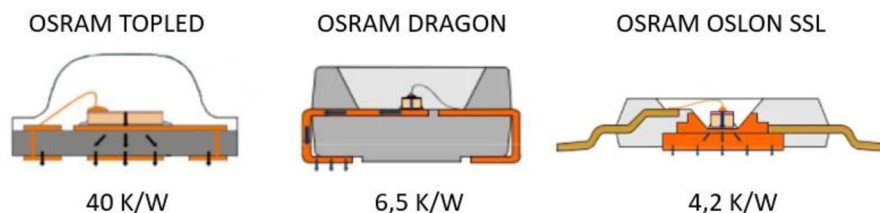
$$\dot{Q} = P_{el} - P_{opt} \quad (3.2)$$

To lze upravit na:

$$\dot{Q} = P_{el} \cdot (1 - \eta_{opt}) \quad (3.3)$$

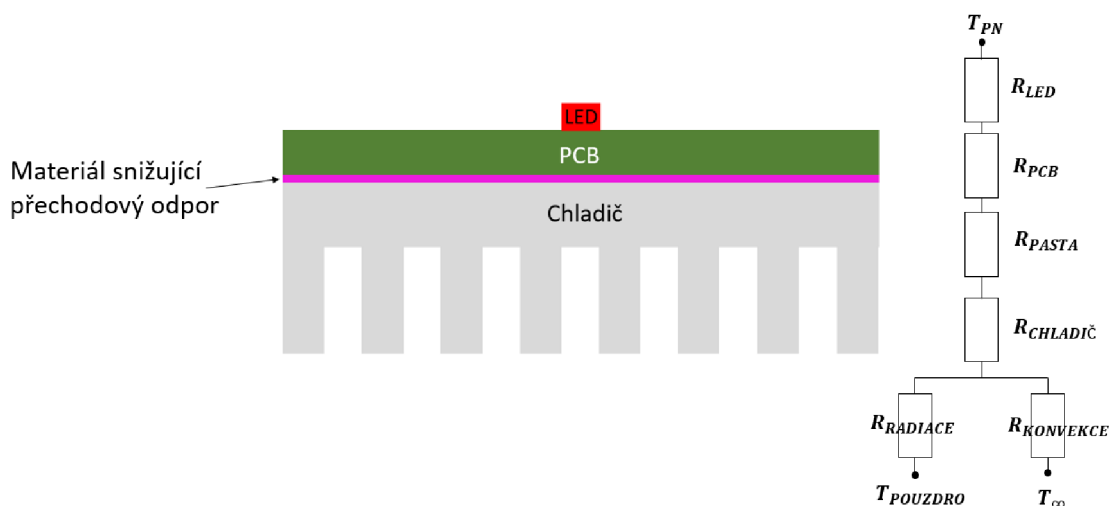
η_{opt}	[-]	Optická účinnost LED
--------------	-----	----------------------

Hodnoty odporů jsou od 120 až do $3 \text{ K} \cdot \text{W}^{-1}$ [61], ale obvyklé hodnoty u LED čipů používané v automotive jsou okolo $10 \text{ K} \cdot \text{W}^{-1}$.



Obr. 30 Ukázka různých provedení LED čipů včetně přechodových odporů [61]

3.7 PŘENOS TEPLA Z LED NA CHLADIČ

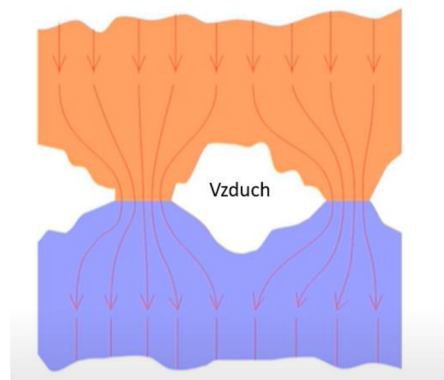


Obr. 31 Znázornění přenosu tepla z LED na chladič a následně z chladiče do prostředí

Přenos z LED na chladič lze znázornit pomocí odporů, kdy každá vrstva klade určitý odpor proti vedení tepla. Tyto odpory jsou různě velké, kdy záleží na součiniteli teplotní vodivosti a tloušťce vrstvy. Dále je zde znázorněn přenos mezi chladičem a okolím, kde dochází jak k radiaci, tak ke konvekci. Z důvodu velmi nízké emisivity povrchů chladičů, které se obvykle používají z velmi lesklého hliníku, je většina tepla odváděna pomocí konvekce.

3.8 SNIŽOVÁNÍ PŘECHODOVÝCH ODPORŮ

Žádný z reálných povrchů není dokonalý, a proto v mikrostruktuře vznikají oblasti, kdy se povrchy nedotýkají a je mezi nimi vzduch [51]. V praxi je těchto oblastí více než 90 % [62], a jelikož je vzduch velice špatný vodič tepla, dochází ke zhoršování přenosu tepla mezi povrchy. Tento fakt musíme brát v potaz při výpočtu přenosu tepla mezi chladičem a PCB. Matematicky popisuje přechodový odpor, tedy konstantní tepelný odpor rovnice 2.11.



Obr. 32 Znáornění přechodového odporu [51]

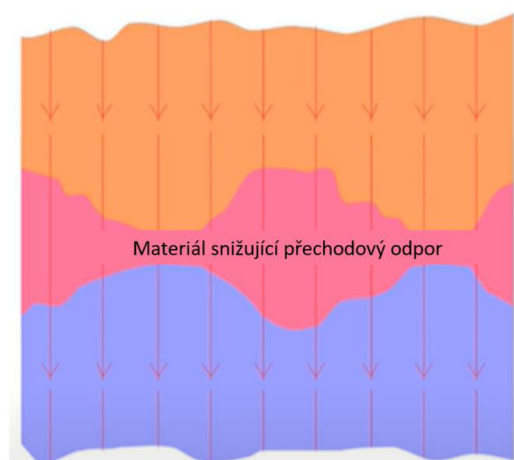
Tento problém lze řešit několika způsoby:

Úprava povrchu

Zlepšením kvality povrchu je možné dosáhnout například lepší povrchovou úpravou povrchu (např. broušení, lapování). Tímto se zmenší drsnost povrchu a tím se sníží množství vzduchu mezi povrchy. Toto řešení je ideální pro PCB technologie IMS, protože je schopné dodržet rovinnost povrchu, ale PCB typu FR4 (hlavně pak větší kusy) s tímto mívají problém a je nutné využít jiná řešení, která jsou níže popsána.

Materiály snižující přechodový odpor

Tyto materiály slouží k eliminaci vrstvy vzduchu a úplného vyplnění prostoru mezi povrchy. Toto je výhodné, protože tyto materiály mají zpravidla lepší tepelnou vodivost než vzduch a tím pádem se přechodový odpor s jejich použitím zmenší [62]. Existují materiály, které po vytvrzení plní i funkci upevnění PCB na chladič.



Obr. 33 Znáornění materiálu snižující přechodový odpor [51]

Teplovodivá pasta

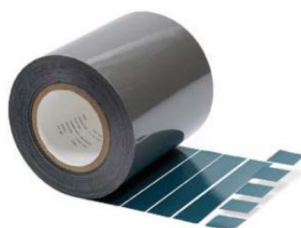
Jedná se obvykle o látky na bázi silikonu s malými vodivými částicemi [51]. Jejich výhodou je velmi úzká vrstva a jednoduchá aplikace, která nevyžadující tlakové spojení. Nevýhodou je složitější používání ve velkosériové výrobě [51]. Obvyklá tepelná vodivost je okolo 1 až 3 $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ v závislosti na viskozitě [62].



Obr. 34 Ukázka teplovodivé pasty [62]

Vodivé lepicí pásky

Jedná se o speciální oboustranné lepicí pásky, které slouží ke zlepšení vodivosti mezi chladičem a PCB, ale zároveň plní funkci spojovacího materiálu, nicméně nemají ale moc dobré teplovodivé vlastnosti [63].



Obr. 35 Teplovodivá páska [62]

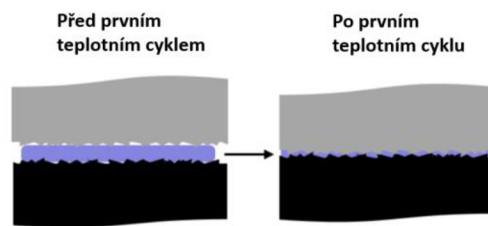
Lepidla

Tyto lepidla plní stejnou funkci jako vodivé lepicí pásky, tedy udržet PCB na místě a snižovat přechodový odpor, ale mají lepší teplovodivé vlastnosti. Jejich nevýhodou je nutnost složité přípravy směsi, kdy se obvykle musí těsně před aplikací smíchat několik látek, aby lepidlo správně fungovalo, a také nemožnost demontáže [64].

Materiál s fázovou změnou

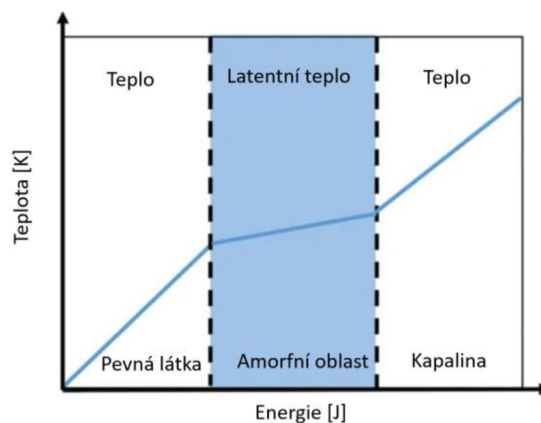
Hlavní výhodou tohoto materiálu je pevné skupenství při pokojové teplotě, což velmi usnadňuje aplikaci, a také až čtyřnásobné snížení přechodového odporu oproti teplovodivé

pastě [65]. Při prvním použití dosáhne materiál teploty fázové změny a začne téct, tudíž dokonale vyplní prostor mezi PCB a chladičem.



Obr. 36 Ukázka vyplnění prostoru pomocí materiálu s fázovou změnou [66]

Tyto materiály se začínají používat jako krátkodobé chladiče, protože potřebují velké množství tepla (latentního tepla) pro změnu z pevného do kapalného skupenství. Jelikož tento děj probíhá při konstantní teplotě, je schopen po omezenou dobu vysoce efektivně daný komponent chladit [67]. Následně, když je zdroj tepla neaktivní, se komponent postupně vrátí do pevného skupenství a uvolní teplo do okolí.



Obr. 37 Chování materiálu s fázovou změnou [67]

Obvykle se používají ve světlometech teplovodivé pasty nebo lepidla. Pokud je to možné, snaží se konstruktéři vyhnout materiálu snižující přechodový odpor. Tepelný odpor bere v potaz tloušťku materiálu.

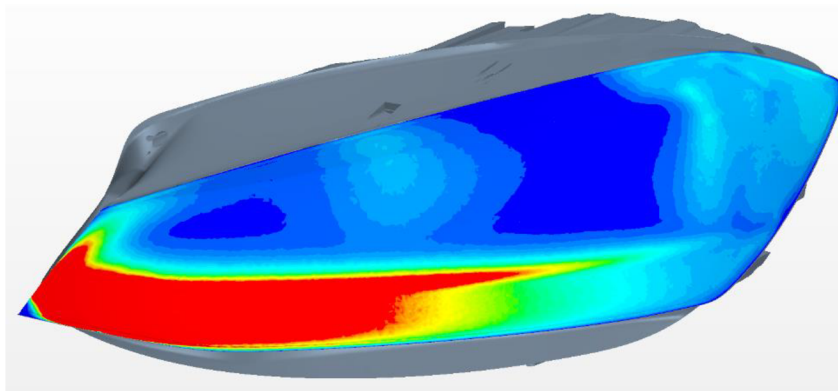
Tabulka 4 Srovnání parametrů jednotlivých materiálů [68]

Materiál snižující přechodový odpor	Součinitel teplotní vodivosti	Tepelný odpor	Tloušťka materiálu	Demontovatelnost
Teplovodivá pasta	DOBŘÝ	VÝBORNÝ	VÝBORNÁ	DOBŘÁ
Vodicí lepicí pásy	ŠPATNÝ	ŠPATNÝ	ŠPATNÁ	VÝBORNÁ
Lepidla	DOBŘÝ	DOBŘÝ	VÝBORNÁ	ŠPATNÁ
Materiál s fázovou změnou	VÝBORNÝ	DOBŘÝ	ŠPATNÁ	DOBŘÁ

3.9 PROUDĚNÍ VE SVĚTLOMETU

Obvykle je proudění dosaženo pomocí větracích otvorů na zadní straně světlometu. Vždy je část umístěna ve spodní části (tyto díry nasávají studený vzduch) a část nich je v horní části světlometu (tudy se teplý vzduch odvádí). Je snahou, aby se proudění dělo jen na základě přirozené konvekce, tedy kvůli rozdílu teplot vzduchu, ale často se musí přistoupit k použití větráčků, které nám pomáhají proudění usměrnit a také zrychlit. Aby docházelo ke správnému proudění, je nutné navrhovat díly tak, aby mu nebránily a směřovaly tam, kam ho směřovat chceme. Tyto aspekty se kontrolují pomocí CFD simulací.

Proudění je velice zásadní i z hlediska mlžení světlometu. V ročních obdobích, kdy vysoká relativní vlhkost vzduchu, obvykle jaro nebo podzim, se dostává vlhký vzduch pomocí větracích otvorů do světlometu a při snížení teploty uvnitř na teplotu nižší než teplota rosného bodu, dochází k mlžení světlometů. Obvykle voda kondenzuje na krycích sklech. Proto je nutné, aby docházelo k správnému proudění. Obvykle je snaha o to, aby co nejvíce vzduchu proudilo na krycí skla, což společně s ohřátím vzduchu pomocí zdroje tepla docílí snížení relativní vlhkosti pod 100 %. Také se tento problém může řešit pomocí speciálních nátěrů, které brání kondenzaci vody na krycích sklech [69].



Obr. 38 Proudění vzduchu ve světlometu v okolí krycího skla (červená barva – výborné proudění, modrá barva – slabé proudění) [69]

4 NÁVRH CHLADIČE A PCB

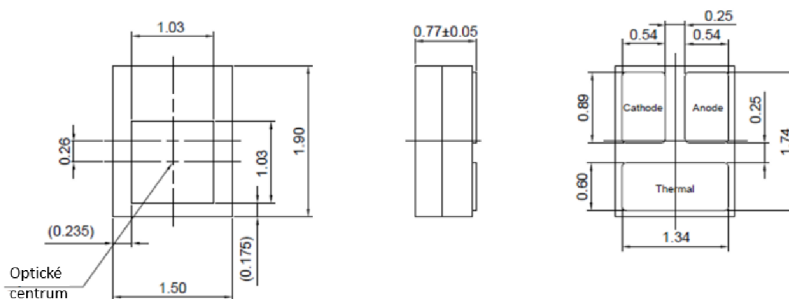
Cílem je navrhnout chladič pro LED čip denního svícení automobilu, který by splňoval požadavky dané výrobcem automobilu při co nejnižší ceně. Důraz je také kladen na použitelnost ve velkosériové výrobě.

Výrobce automobilů má vždy několik rozdílných okrajových podmínek (teplota okolí, množství tepla od motoru, intenzita slunečního záření...), při kterých se konají simulace a následně zkoušky světlometů. V této práci bude vyhodnocován základní požadavek, kdy při plném zapnutí všech LED denního svícení a teplotě okolí 25 °C nesmí dojít k překročení teploty 70 °C v místě, kde je na desce umístěn LED čip. Z důvodu zjednodušení, je zanedbáno teplo přicházející od motoru a teplo ve formě slunečního záření.

Velikost PCB je předem stanovena na 60 x 30 mm a také je přesně dáno umístění LED čipů. Velikost chladiče kvůli zástavbovému místu ve světlometu je maximálně 140 x 40 x 40 mm.

4.1 LED ČIP

Pro toto použití byly vybrány 3 LED čipy Samsung C-series bílé barvy, které jsou určeny do použití v automobilových světlech. Jejich rozměr je 1,5 x 1,9 mm a celkový výkon je 4,5 W a z toho je tepelný tok, který je veden do PCB 1,4 W. LED má tepelný odpor 3,8 K · W⁻¹.



Obr. 39 Návrh použitého LED čipu [70]

Tyto led čipy mají na spodní straně tři plošky, z nichž dvě slouží k elektrickému zapojení a jedna slouží k odvodu tepla. Tepelnou vodivost LED lze vypočítat jako:

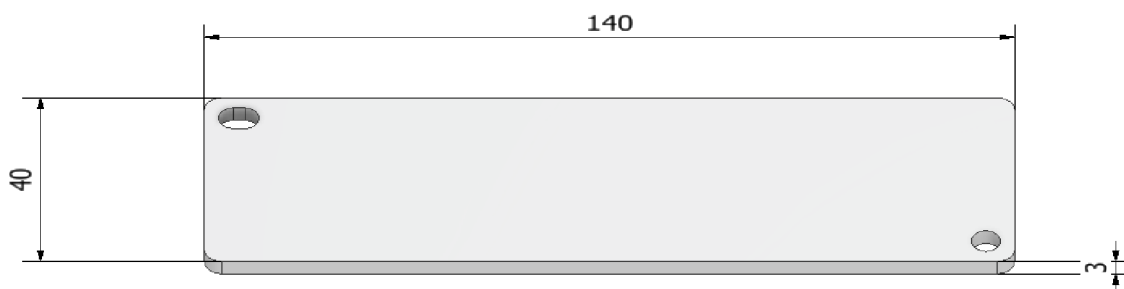
$$\lambda_{LED} = \frac{L_{LED}}{R_{LED} \cdot S_{LED}} = \frac{0,77 \cdot 10^{-3}}{3,8 \cdot 2,85 \cdot 10^{-6}} = 71,1 \frac{W}{m \cdot K} \quad (4.1)$$

4.2 CHLADIČ

Nabízejí se dvě varianty chladiče, a to z hliníku s čistotou 99,5 %.

Chladič ve tvaru desky

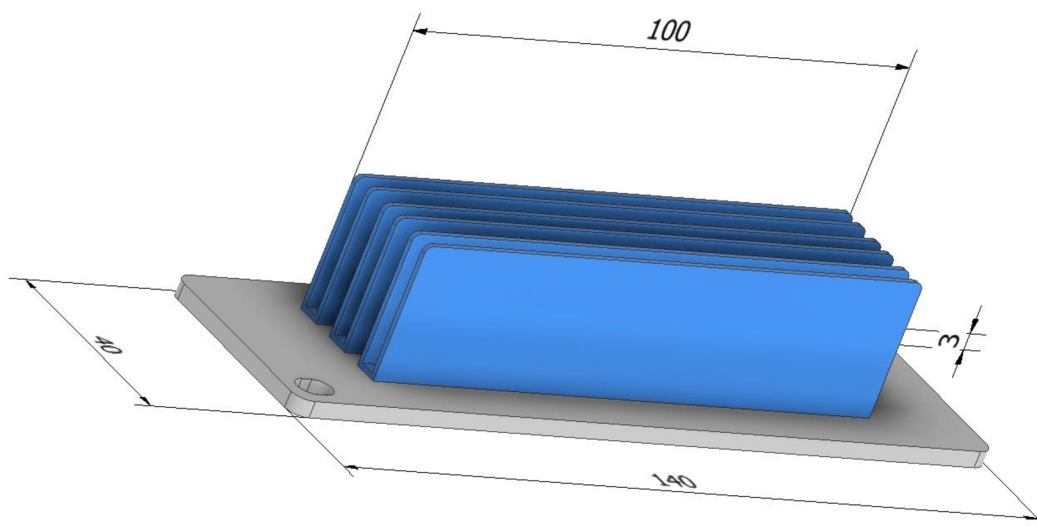
První návrh má velmi jednoduchý tvar, kdy je chladič tvořen pouze deskou plechu o tloušťce 3 mm. Obsahuje dvě díry pro montáž. Tento chladič by se vyráběl stříháním. Jedná se o velmi levné řešení.



Obr. 40 Deskový chladič

Chladič se žebry

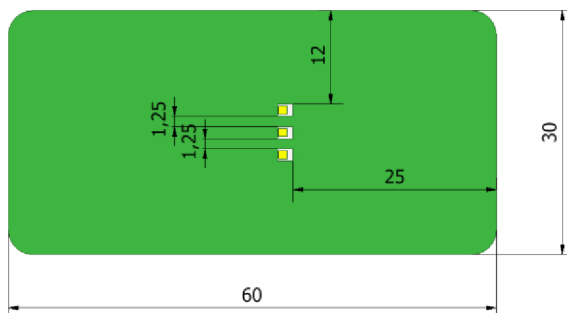
Druhá varianta chladiče vychází z chladiče prvního, ale byly zde přidány chladičí žebra. Celkem 3 páry žebor o tloušťce 1 mm. Žebra by se vyráběla pomocí ohýbání a následně by se nýtovala na předem připravená místa na desku. Toto řešení je finančně náročnější.



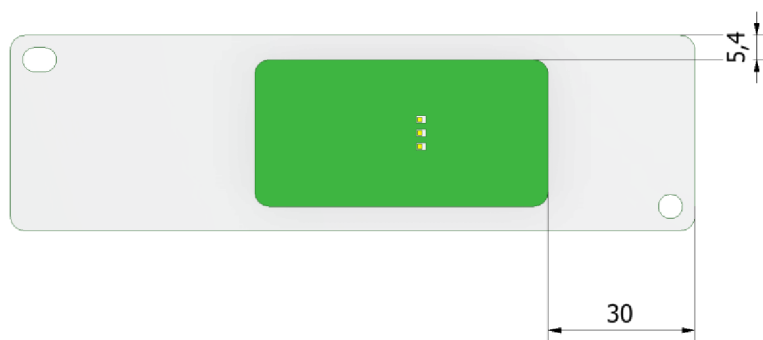
Obr. 41 Chladič se žebry

4.3 PCB

U tvaru PCB byly pro zjednodušení vynechány díry. Každé PCB budu testovat s oběma druhy chladičů. Jejich tvar a umístění na chladiči je následující:



Obr. 42 Umístění LED na PCB



Obr. 43 Umístění PCB na chladiči

FR4

Předpokládáme osázení součástkami pouze na jedné straně PCB, proto se deska skládá z 2 mm vrstvy materiálu FR4 a 80 μm mědi.

FR4 + PTH via

V tomto případě předpokládáme stejnou desku jako v minulém případě s tím rozdílem, že v okolí LED čipů jsou umístěny via. Via budou v okolí 5 mm od čipů a mají průměr 0,4 mm a vrstvu mědi 30 μm .

IMS

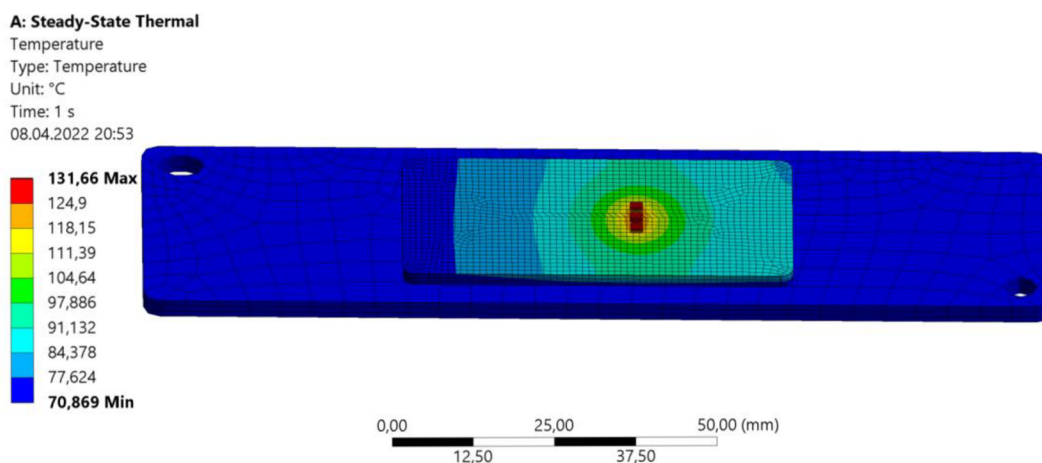
Tato deska bude tvořena vrstvou o šířce 1mm hliníku, 80 μm dielektrika a 70 μm mědi.

4.4 SIMULACE

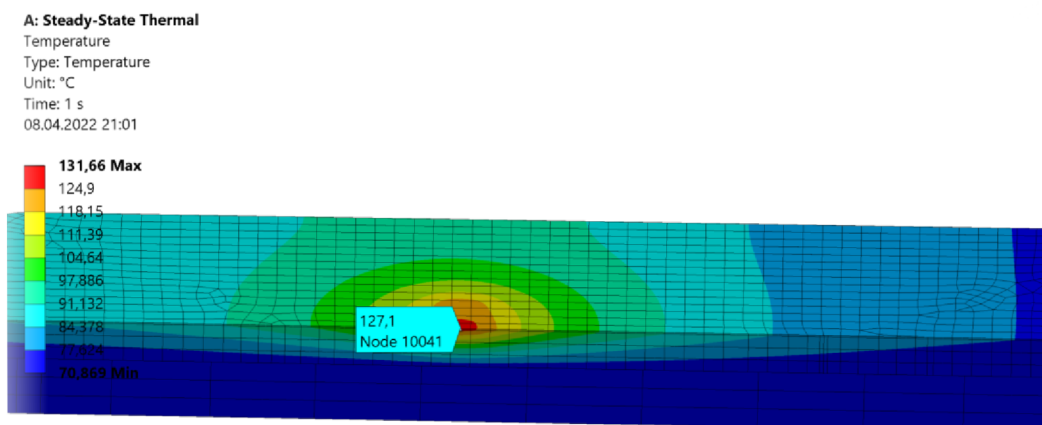
4.4.1 PODMÍNKY SIMULACE

Z výsledků CFD simulace byla zadána hodnota konvekce na plochy deskového chladiče a PCB na $6 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ a na plochy žebér $15 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$. Tato hodnota není na všech místech konstantní, ale z důvodu zjednodušení se hodnoty zprůměrovaly. Na horní stranu LED byl zadán tepelný tok $1,4 \text{ W}$. Okolní teplota simulace je $25 \text{ }^\circ\text{C}$. Bylo nastaveno záření na chladiči s emisivitou $0,03$ a přechodové odpory byly zanedbány. Výsledky jsou v ustáleném stavu.

4.4.2 FR4 + DESKOVÝ CHLADIČ



Obr. 44 Znárodnění výsledku simulace FR4 + deskového chladiče



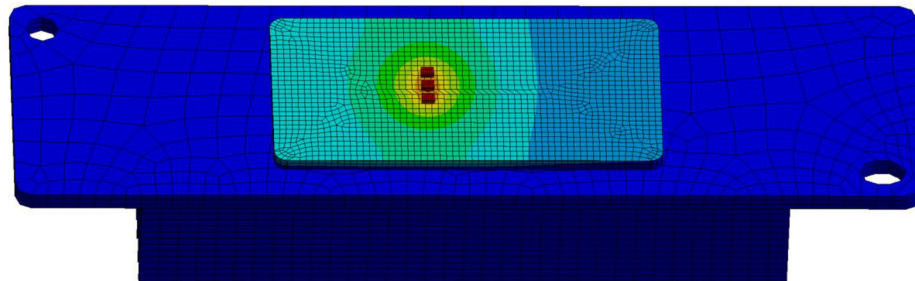
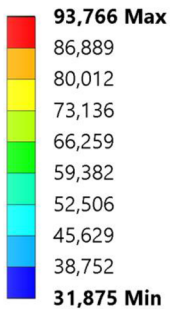
Obr. 45 Výsledek simulace v řezu se znázorněnou maximální teplotou na PCB

V tomto případě dosahuje nevyšší vypočítaná hodnota na desce PCB přibližně $127 \text{ }^\circ\text{C}$.

4.4.3 FR4 + CHLADIČ SE ŽEBRY

A: Steady-State Thermal

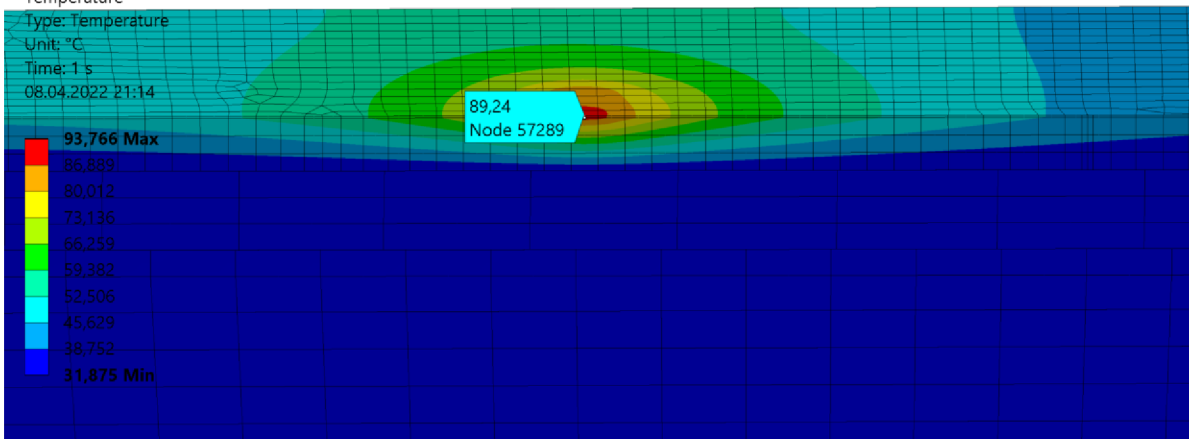
Temperature
Type: Temperature
Unit: °C
Time: 1 s
08.04.2022 21:13



Obr. 46 Znáznornění výsledku simulace FR4 + chladiče se žebry

A: Steady-State Thermal

Temperature
Type: Temperature
Unit: °C
Time: 1 s
08.04.2022 21:14



Obr. 47 Výsledek simulace v řezu se znázorněnou maximální teplotou na PCB

V případě použití většího chladiče se teplota na desce sníží na **89 °C**, tato hodnota stále přesahuje limitní teplotu 70 °C. Hlavní příčinou je špatná tepelná vodivost materiálu FR4.

4.4.4 FR4 S VIA + DESKOVÝ CHLADIČ

A: Steady-State Thermal

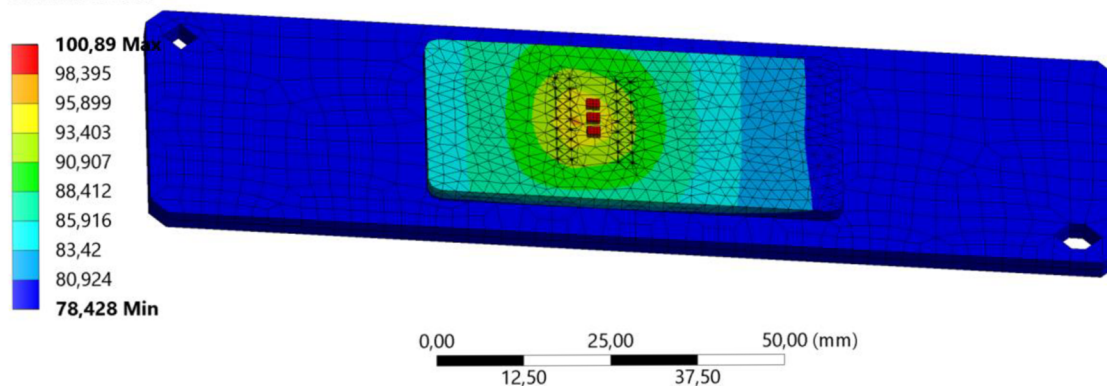
Temperature

Type: Temperature

Unit: °C

Time: 1 s

09.04.2022 15:00



Obr. 48 Znáornění výsledku simulace FR4 s via + deskového chladiče

A: Steady-State Thermal

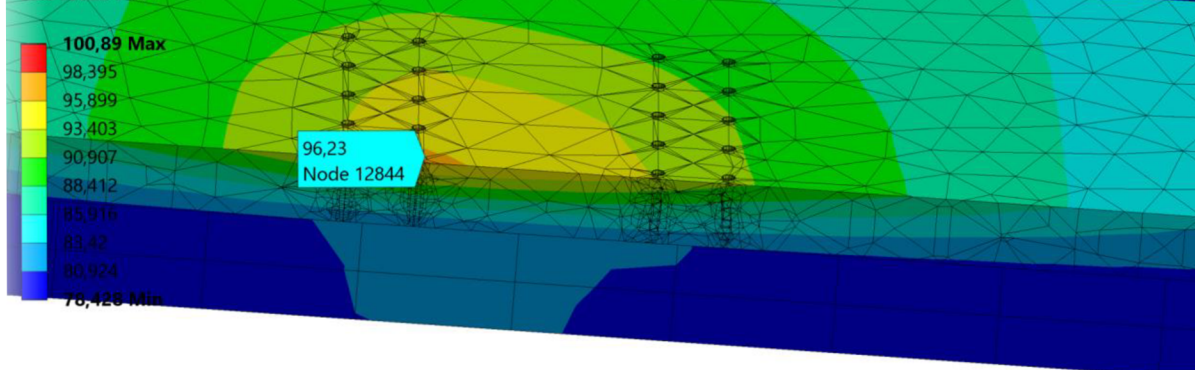
Temperature

Type: Temperature

Unit: °C

Time: 1 s

09.04.2022 15:01



Obr. 49 Výsledek simulace v řezu se znázorněnou maximální teplotou na PCB

Při použití via lze ze simulace vidět, že se více tepla dostává do spodní strany desky a tím se zlepšují tepelné vlastnosti. Ale z důvodu malé plochy chladiče není možné dosáhnout požadované hodnoty teploty, jelikož maximální teplota na PCB přesahuje **96 °C**.

4.4.5 FR4 S VIA + CHLADIČ SE ŽEBRY

A: Steady-State Thermal

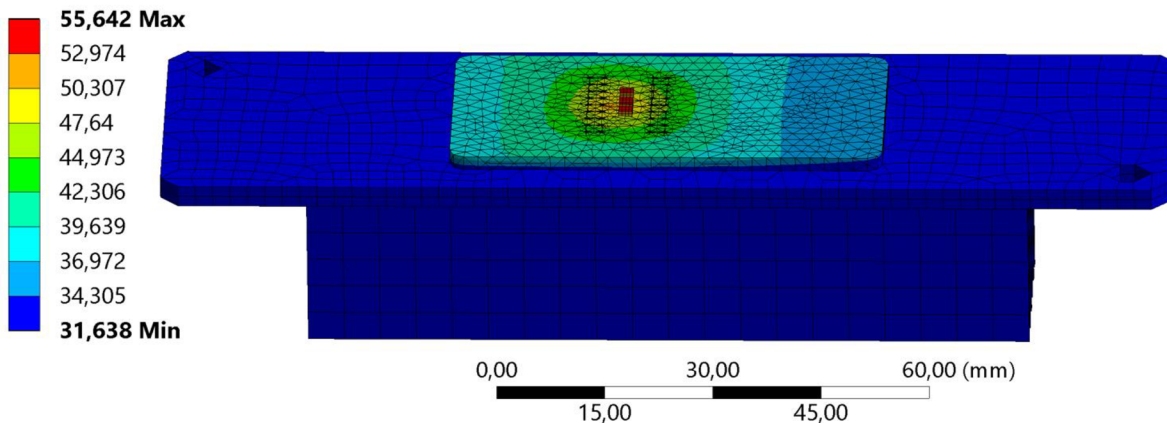
Temperature

Type: Temperature

Unit: °C

Time: 1 s

09.04.2022 15:05



Obr. 50 Znáornění výsledku simulace FR4 s via + chladiče se žebry

A: Steady-State Thermal

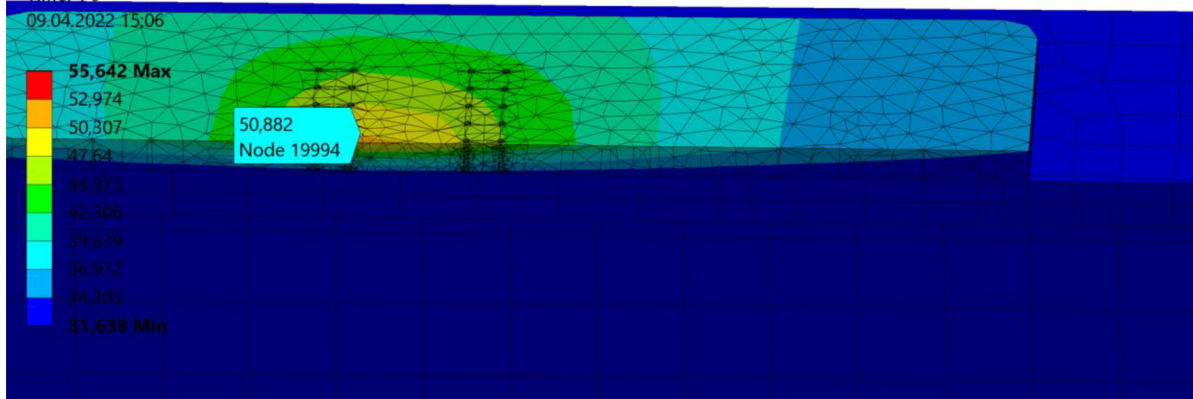
Temperature

Type: Temperature

Unit: °C

Time: 1 s

09.04.2022 15:06



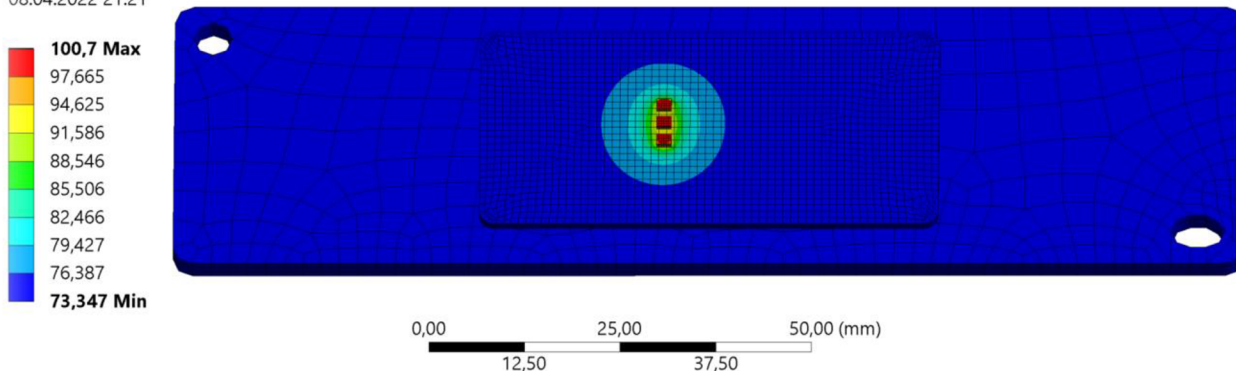
Obr. 51 Výsledek simulace v řezu se znázorněnou maximální teplotou na PCB

Při použití většího chladiče je maximální teplota na ploše PCB jen pouhých **55 °C**, tím pádem tento návrh splňuje požadavky výrobce automobilů a je možné ho použít.

4.4.6 IMS + DESKOVÝ CHLADIČ

A: Steady-State Thermal

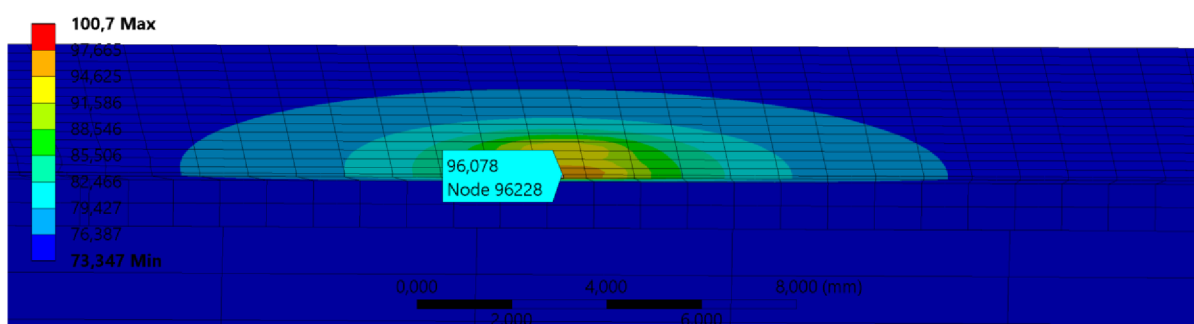
Temperature
Type: Temperature
Unit: °C
Time: 1 s
08.04.2022 21:21



Obr. 52 Znáornění výsledku simulace IMS + deskového chladiče

A: Steady-State Thermal

Temperature
Type: Temperature
Unit: °C
Time: 1 s
08.04.2022 21:23



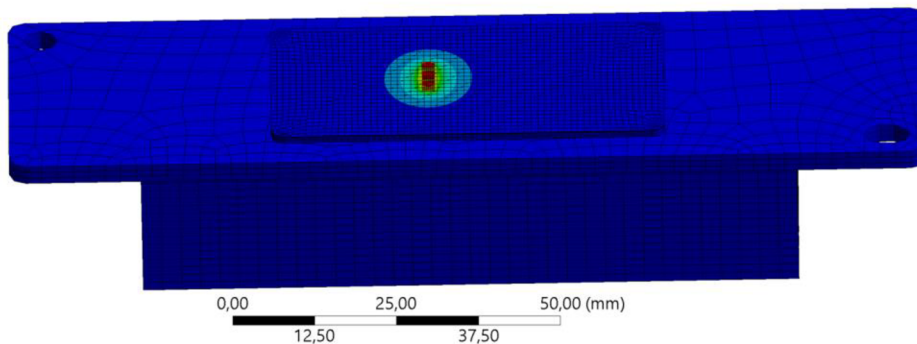
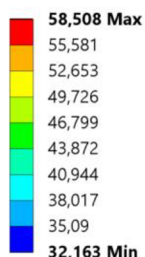
Obr. 53 Výsledek simulace v řezu se znázorněnou maximální teplotou na PCB

Ze simulace lze vidět velkou výhodu PCB IMS, kdy je teplota PCB velmi konstantní (díky dobré teplotní vodivosti hliníku) a vyšší teplota je pouze v těsném okolí LED čipů. Zde bylo dosaženo maximální hodnoty **96 °C**. A tudíž tato varianta není přípustná.

4.4.7 IMS + CHLADIČ SE ŽEBRY

A: Steady-State Thermal

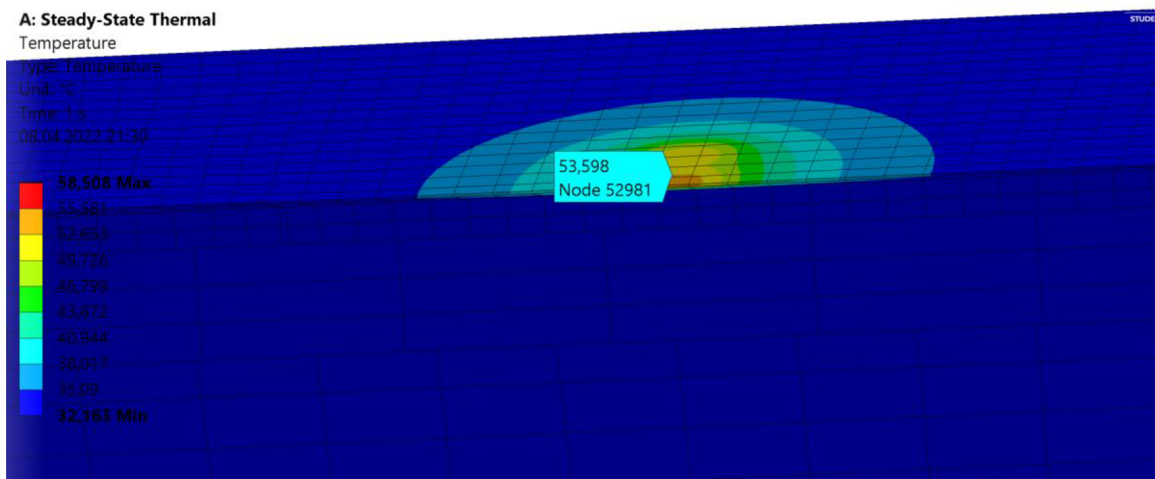
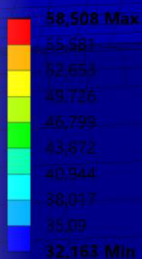
Temperature
 Type: Temperature
 Unit: °C
 Time: 1 s
 08.04.2022 21:29



Obr. 54 Znáornění výsledku simulace IMS + chladiče se žebry

A: Steady-State Thermal

Temperature
 Type: Temperature
 Unit: °C
 Time: 1 s
 08.04.2022 21:30



Obr. 55 Výsledek simulace v řezu se znázorněnou maximální teplotou na PCB

S použitím většího chladiče teplota na PCB klesá na přibližně **54 °C**, což dělá tento návrh použitelným.

4.5 VÝSLEDKY SIMULACÍ

Ze simulací, které proběhly v předchozí podkapitole vyplývá, že lze použít kombinaci chladiče se žebry společně s PCB IMS nebo FR4 s via. V obou případech by byla možná optimalizace v podobě zmenšení chladiče. Velmi zásadním faktorem se také ukázala hodnota součinitele přestupu tepla, která výrazně ovlivňuje výsledné řešení. Následně byly tyto dvě možnosti poslány dodavateli, kdy na základě výsledné ceny byla vybrána kombinace FR4 s via a chladiče se žebry. Reálná výsledná teplota bude mírně vyšší kvůli přechodovému odporu. V tabulce jsou shrnuty všechny výsledky, kterých byly dosaženo.

Tabulka 5 Srovnání maximální teplot na PCB

Varianta	Maximální teplota na PCB [°C]
FR4 + deskový chladič	127,1
FR4 + chladič se žebry	89,24
FR4 s via + deskový chladič	96,23
FR4 s via + chladič se žebry	50,88
IMS + deskový chladič	96,06
IMS + chladič se žebry	53,59

ZÁVĚR

Klasické zdroje světla, tedy halogeny nebo xenony, jsou v současné době nahrazovány technologií LED. Zachování vysoké životnosti dané technologie se však neslučuje s trendem snižování velikosti světlometů, jelikož ten může způsobovat problémy s chlazením. Praktickým řešením může být použití desek plošných spojů s lepšími teplovodivými vlastnostmi anebo využití aktivního chlazení.

Na základě řady simulací byly jako výhodné varianty zvoleny FR4 s via a IMS společně s chladičem se žebry, jelikož tyto kombinace vykazovaly maximální teplotu PCB v místě LED čipu nižší než maximální možnou danou výrobcem automobilu. Na základě ceny byla následně vybrána varianta FR4 s via.

V budoucnosti lze očekávat zvýšení světelného výkonu, což společně s rostoucím zájmem o menší velikost světlometů povede k novým výzvám v oblasti teplotního managementu a celkové konstrukci světlometu. Pravděpodobně dojde k použití nových materiálů chladičů jako jsou teplovodivé plasty nebo chladiče z grafitu. S nárůstem technologické složitosti těchto světlometů porostou požadavky na specialisty, kteří budou muset být schopni aplikovat nové technologie. Při návrhu těchto technologií budou ještě ve větší míře využívány multifyzikální simulace, které zahrnují kombinaci tepelných výpočtů a CFD. Příkladem může být produkt Ansys Discovery, který umožňuje kombinovat multifyzikální simulace s modelováním geometrie v jednom prostředí. Nové nároky a směry by mohly být důsledky rozvoje autonomních vozidel, kde by osvětlení mělo význam pouze pro upozornění ostatních účastníků provozu nebo například pro zjištění informací z kamerových systémů. Přepokládá se také rozvoj technologie laserových světel, které by umožnily výrazně vyšší hodnoty intenzity osvětlení na velkých vzdálenostech. Aktuální problémy, jako je vysoká cena nebo omezující legislativa, jsou vyřešitelné, a stejně jako technologie LED se laserová světla mohou postupně dostat od luxusních aut až do základních modelů. To samé lze říct o technologii OLED, u které se očekává její vývoj a následné nahrazení technologie LED.

Při zpracovávání této bakalářské práce bylo možno využít autorových dosavadních znalostí, nicméně určitá data a postupy byly získány na základě spolupráce s pracovníky společnosti HELLA a dodatečného výzkumu/studia autora. Nově poznané souvislosti zvýšily autorův zájem o danou problematiku a jedná se o oblast, kterou by se v blízké budoucnosti rád více zabýval.

POUŽITÉ INFORMAČNÍ ZDROJE

- [1] Automotive lighting. *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2022-03-14]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Automotive_lighting#cite_note-23
- [2] *Fyzika 2*. Brno: VUTIUM, 2013. ISBN 978-80-214-4123-1.
- [3] Teplota a barva světla. *Epřehledy* [online]. 2014 [cit. 2022-03-14]. Dostupné z: http://www.eprehledy.cz/teplota_a_barva_svetla.php
- [4] Fotometrické veličiny. *Encyklopedie fyziky* [online]. c2006-2022 [cit. 2022-03-14]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/535-fotometricke-veliciny>
- [5] OSRAM. Light is motion: Light range 2019/2020. *OSRAM* [online]. 2019 [cit. 2022-03-14]. Dostupné z: <https://www.osram.com/am/light-for/led-lighting/index.jsp>
- [6] HELLA. Light is motion: KNOW-HOW PRO PROFESIONÁLY Z AUTOSERVISŮ. *HELLA* [online]. [cit. 2022-03-14]. Dostupné z: https://www.hella.com/hella-tech-world-cz-cs/assets/media/Light_Technical_cz.pdf
- [7] Bezpečnost: Nové asistenční systémy a světe Iná technika LED. *Škoda storyboard* [online]. 2018 [cit. 2022-03-14]. Dostupné z: <https://www.skoda-storyboard.com/cs/tiskove-mapy/uspesny-model-skoda-fabia-s-osvezenym-designem-a-novou-technikou/bezpecnost-nove-asistencni-systemy-a-svetelna-technika-led/>
- [8] The evolution of car headlights. *Hyundai newsroom* [online]. c2022 [cit. 2022-03-14]. Dostupné z: <https://www.hyundai.news/eu/articles/stories/the-evolution-of-car-headlights.html>
- [9] *SVĚTLO: Světelné zdroje – halogenové žárovky* [online]. 2008. FCC Public, 2008 [cit. 2022-03-14]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/svetlo/casopis/tema/svetelne-zdroje-halogenove-zarovky--15892>
- [10] HELLA. *XENON HEADLIGHTS. HELLA* [online]. [cit. 2022-03-14]. Dostupné z: <https://www.hella.com/techworld/uk/Technical/Automotive-lighting/Xenon-headlights-218/#>
- [11] HLUBINKA, D. Teplotní vlastnosti automobilových zdrojů světla - Halogenové zdroje. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2017. 61 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Marcel Janda, Ph.D..
- [12] *SVĚTLO: LED – nová generace v osvětlování* [online]. 2006. FCC Public, 2006 [cit. 2022-03-14]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/svetlo/casopis/tema/led-nova-generace-v-osvetlovani--16152>
- [13] Nová Škoda Fabia LED světla. *Škoda auto* [online]. c2022 [cit. 2022-03-14]. Dostupné z: <https://www.skoda-auto.cz/modely/nova-fabia/nova-fabia/fabia-led-svetla?state=OK&aid=686aee85-a5d5-4ea0-8360-dbc93ae587e7>

- [14] LED vs Xenon HID Headlights - Which Are Better?. *XenonPro* [online]. c2019 [cit. 2022-03-30]. Dostupné z: <https://www.xenonpro.com/led-vs-xenon-hid-headlights-which-are-better>
- [15] How is white light made with LEDs?. *NLPIP* [online]. c2003 [cit. 2022-03-14]. Dostupné z: <https://www.lrc.rpi.edu/programs/nlpip/lightinganswers/led/whitelight.asp>
- [16] How LEDs Produce White Light. *PhotonStarTechnology* [online]. [cit. 2022-03-14]. Dostupné z: http://www.photonstartechnology.com/learn/how_leds_produce_white_light
- [17] VALENTA, Jan. Výroba „bílých“ svítivých diod a související pokusy: Foto- a elektroluminiscence jako základ revoluce v osvětlování. *Souhrnný sborník veletrhu nápadů učitelů fyziky* [online]. 2016 [cit. 2022-03-14]. Dostupné z: <https://vnuf.cz/sbornik/prispevky/18-30-Valenta.html>
- [18] OSRAM. Thermal Characteristics of LEDs. *OSRAM* [online]. c2022 [cit. 2022-03-14]. Dostupné z: https://www.osram-latam.com/os/products/led-general-lighting/tools-y-service/led-fundamentals/thermal_characteristics_of_leds.jsp
- [19] CREE. *Thermal Management of XLamp® LEDs* [online]. In: . c2004-2021 [cit. 2022-03-14]. Dostupné z: <https://cree-led.com/media/documents/XLampThermalManagement.pdf>
- [20] OSRAM. Electrical Characteristics of LEDs. *OSRAM* [online]. c2022 [cit. 2022-03-14]. Dostupné z: https://www.osram-latam.com/os/products/led-general-lighting/tools-y-service/led-fundamentals/electrical_characteristics_of_leds.jsp
- [21] KEEPING, Steven. Thermal Effects on White LED Chromaticity. *Digy-Key* [online]. 2013 [cit. 2022-03-14]. Dostupné z: <https://www.digikey.cz/en/articles/thermal-effects-on-white-led-chromaticity>
- [22] Chlazení LED diod a účinnost. *Vaelektronik* [online]. [cit. 2022-03-14]. Dostupné z: http://vaelektronik.cz/led_chlaz.html
- [23] RUMAR, Kåre. *RELATIVE MERITS OF THE U.S. AND ECE HIGH-BEAM MAXIMUM INTENSITIES AND OF TWO- AND FOUR-HEADLAMP SYSTEMS* [online]. Michigan, 2000 [cit. 2022-03-15]. Dostupné z: <https://deepblue.lib.umich.edu/bitstream/handle/2027.42/49438/UMTRI-2000-41.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Technical report. The University of Michigan, Transportation Research Institute.
- [24] Laserová světla pro světlomety. *OSRAM* [online]. [cit. 2022-03-15]. Dostupné z: <https://www.osram.cz/am/specials/trendslighting-innovations/laser-light-new-headlight-technology/index.jsp>
- [25] Lighting systems. *Volkswagen* [online]. c2022 [cit. 2022-03-15]. Dostupné z: <https://www.volkswagen.co.uk/en/technology/comfort/automotive-lighting.html>
- [26] SEIDL, Jan. Denní svícení. *Autolexicon* [online]. c2022 [cit. 2022-03-15]. Dostupné z: <https://www.autolexicon.net/cs/articles/denni-sviceni/>

- [27] HELLA. MULTIBEAM LED hlavní světlomet [online]. 2016 [cit. 2022-03-15]. Dostupné z: https://www.youtube.com/watch?v=p3U3_pkVTyc. Kanál uživatele HELLA CZECH.
- [28] KAMAT, Susmita a Swampil SHINDE. *Thermal Analysis of Automotive Headlamp* [online]. Maharashtra, 2018 [cit. 2022-03-15]. Dostupné z: <https://www.irjet.net/archives/V5/i7/IRJET-V5I7183.pdf>. Dept. of Mechanical Engineering, Govt. College of eng. Karad, Maharashtra.
- [29] ÇENGEL, Yunus. *Introduction to Thermodynamics and Heat Transfer. 2.* The McGraw-Hill Companies, 2008. ISBN 0-390-86122-7.
- [30] Solids, Liquids and Gases - Thermal Conductivities. *The Engineering Toolbox* [online]. [cit. 2022-03-15]. Dostupné z: https://www.engineeringtoolbox.com/thermal-conductivity-d_429.html
- [31] ŠTĚTINA, Josef. Základy přenosu tepla [online]. [cit. 2022-03-15]. Prezentace. Vysoké učená technické v Brně.
- [32] ŠTĚTINA, Josef. Přenos tepla vedením [online]. [cit. 2022-03-15]. Prezentace. Vysoké učená technické v Brně.
- [33] Fundamentals of Thermal Resistance. *Mechanical Engineering* [online]. 2016 [cit. 2022-03-15]. Dostupné z: <http://mechblogs.com/2016/06/fundamentals-of-thermal-resistance/>
- [34] POKORNÝ, Marek. *Proudění tepla: Teorie požáru* [online]. 2006 [cit. 2022-03-15]. Dostupné z: http://fire.fsv.cvut.cz/vzdelavani/specialiste/1/1-3_Proudeni_tepla.pdf. Fakulta stavební, ČVUT v Praze.
- [35] Mezní vrstva. *Aerodynamika vysokých rychlostí VŠB* [online]. 2007 [cit. 2022-03-15]. Dostupné z: [https://aerodynamika-vysokych-rychlosti-vsб.webnode.cz/zaklady-aerodynamiky/mezni-vrstva/](https://aerodynamika-vysokych-rychlosti-vsب.webnode.cz/zaklady-aerodynamiky/mezni-vrstva/)
- [36] ZÁCHA, Pavel. *CFD pro tepelnou techniku I, přednáška Turbulentní proudění* [online]. 2019 [cit. 2022-03-15]. Dostupné z: <http://energetika.cvut.cz/wp-content/uploads/CFD-pro-TT-P03-Zacha-Turbulentni-proudeni.pdf>. ČVUT v Praze.
- [37] KOVERDYNSKÝ, Vít. Technické izolace detailně (III) – návrh technických izolací a využití výpočtových programů. *Tzbinfo* [online]. 2016 [cit. 2022-03-15]. Dostupné z: <https://vytapani.tzb-info.cz/izolace/13879-technicke-izolace-detailne-iii-navrh-technicky-izolaci-a-vyuziti-vypoctovych-programu>
- [38] HASAL, Pavel, Igor SCHREIBER a Dalimil ŠNITA. *Chemické inženýrství I.* Vyd. 2., přeprac. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, 2007. ISBN 978-80-7080-002-7.
- [39] PICMAUSOVÁ, Helena a Miroslava GONDEKOVÁ. *Laminární proudění, neboli Cesta v čase* [online]. [cit. 2022-03-15]. Dostupné z: <http://fyzsem.fjfi.cvut.cz/2012-2013/Leto13/proc/laminarniproudeni.pdf>. Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská, ČVUT v Praze.

- [40] ŠTĚTINA, Josef. Přenos tepla konvekci [online]. [cit. 2022-03-15]. Prezentace. Vysoké učení technické v Brně.
- [41] Tepelné ztráty organismu. *WikiSkripta* [online]. [cit. 2022-03-15]. Dostupné z: https://www.wikiskripta.eu/w/Tepeln%C3%A9_ztr%C3%A1ty_organismu
- [42] Emise a absorpce světla. *Encyklopedie fyziky* [online]. c2006-2022 [cit. 2022-03-15]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/776-emise-a-absorpce-svetla>
- [43] ŠTĚTINA, Josef. Přenos tepla zářením [online]. [cit. 2022-03-15]. Prezentace. Vysoké učení technické v Brně.
- [44] SAINT-GOBAIN CONSTRUCTION PRODUCTS CZ A.S. IsoCal - výpočetní program pro návrh technických izolací. *Tzbinfo* [online]. 2009 [cit. 2022-03-15]. Dostupné z: <https://vytapani.tzb-info.cz/izolace/5583-isocal-vypocetni-program-pro-navrh-technicky-izolaci>
- [45] *PLANCKŮV VYZAŘOVACÍ ZÁKON* [online]. [cit. 2022-03-15]. Dostupné z: <https://eu.fme.vutbr.cz/file/vomm/0202.htm>. Odbor termomechaniky a techniky prostředí, Fakulta strojního inženýrství, Vysoké učení technické v Brně.
- [46] Tepelné záření. *Termokamera.cz* [online]. [cit. 2022-03-15]. Dostupné z: <http://www.termokamera.cz/princip-a-funkce/tepelne-zareni/>
- [47] *WIENŮV POSUNOVACÍ ZÁKON* [online]. [cit. 2022-03-15]. Dostupné z: <https://eu.fme.vutbr.cz/file/vomm/0203.htm>. Odbor termomechaniky a techniky prostředí, Fakulta strojního inženýrství, Vysoké učení technické v Brně.
- [48] EV Heating in Winter. *JustEVs* [online]. [cit. 2022-03-30]. Dostupné z: <https://www.justevs.com/ev-heating-in-winter/>
- [49] PAVELKA, Tomáš. *Provozní vlastnosti LED a jejich modelování* [online]. Brno, 2019 [cit. 2022-03-30]. Dostupné z: https://www.vut.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=139843. Disertační. VUT v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Vedoucí práce Doc. Ing. Petr Baxant, Ph.D.
- [50] Aktivní a pasivní chlazení pomocí tepelného čerpadla. *VISSMANN* [online]. [cit. 2022-03-30]. Dostupné z: <https://www.viessmann.cz/cs/rady-a-tipy/aktivni-pasivni-chlazení-tepelna-cerpdla.html>
- [51] External Thermal Resistance (Interface Materials and Heat Sinks). *OSRAM* [online]. c2022 [cit. 2022-03-30]. Dostupné z: https://www.osram.com/os/products/illumination-applications/tools-and-service/led-fundamentals/external_thermal_resistance_interface_materials_and_heat_sinks.jsp
- [52] MINDL, Pavel. Aktivní chlazení elektrických rozváděčů. *Tzbinfo* [online]. 11.8.2004 [cit. 2022-03-30]. Dostupné z: <https://elektro.tzb-info.cz/bezpecnost-a-revize/2091-aktivni-chlazení-elektricky-rozvadecu>

- [53] Heat Sink: What Does Heat Sink Mean?. *Technopedia* [online]. 18.9.2011 [cit. 2022-03-30]. Dostupné z: <https://www.techopedia.com/definition/2211/heat-sink>
- [54] Vlastnosti hliníku. *Total Materia* [online]. c2021 [cit. 2022-03-30]. Dostupné z: <https://www.totalmateria.com/page.aspx?ID=AluminumProperties&LN=CZ>
- [55] LUKÁČ, Ivan. *Hlinik.info* [online]. 18. 11. 2010 [cit. 2022-03-30]. Dostupné z: <http://www.hlinik.info/clanky/prehled-slevarenskych-hlinikovych-slitin>
- [56] Tlakové lití. *Silesia-tech* [online]. [cit. 2022-03-30]. Dostupné z: <http://www.silesia-tech.cz/tlakove-liti>
- [57] HUDÁK, Ondřej. . *Učební text pro výuku odborného předmětu* [online]. Praha [cit. 2022-03-30]. Dostupné z: https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/89778/MU-BP-2020-Hudak-Ondrej-BP_2020_Hudak_Ondrej.pdf?sequence=-1&isAllowed=y. Bakalářská práce. ČVUT v Praze, Masarykův ústav vyšších studií. Vedoucí práce Doc. Ing. David Vaněček, Ph.D.
- [58] Thermal Simulation Tool for LED Design Requirements. *LED professional* [online]. 15.5.2018 [cit. 2022-03-30]. Dostupné z: <https://www.led-professional.com/resources-1/articles/thermal-simulation-tool-for-led-design-requirements>
- [59] CREE. Optimizing PCB Thermal Performance for Cree XLamp® LEDs. *Digi-Key* [online]. 22.12.2010 [cit. 2022-03-30]. Dostupné z: <https://www.digikey.cz/en/articles/optimizing-pcb-thermal-performance-for-cree-xlamp-leds>
- [60] Via in Pad PCB Design. *MACROFAB* [online]. c2022 [cit. 2022-03-30]. Dostupné z: <https://macrofab.com/blog/via-in-pad-pcb-design/>
- [61] OSRAM. Internal Thermal Resistance of LEDs. *OSRAM* [online]. c2022 [cit. 2022-03-30]. Dostupné z: https://www.osram.com/os/products/illumination-applications/tools-and-service/led-fundamentals/internal_thermal_resistance_of_leds.jsp
- [62] OSRAM. Thermal Interface Materials For Electronics Cooling. *Parker Chomerics* [online]. c2021 [cit. 2022-03-30]. Dostupné z: <https://www.parker.com/literature/Chomerics/Parker%20Chomerics%20Thermal%20Catalog.pdf>
- [63] What is Thermal Tape?. *EasyTechJunkie* [online]. c2003-2022, 9.3.2022 [cit. 2022-03-30]. Dostupné z: <https://www.easytechjunkie.com/what-is-thermal-tape.htm>
- [64] MALCOLM, Tatum. What Is a Thermal Adhesive?. *About Mechanics* [online]. c2003-2022, 20.3.2022 [cit. 2022-03-30]. Dostupné z: <https://www.aboutmechanics.com/what-is-a-thermal-adhesive.htm>
- [65] Phase-Change Material. *Vincotech* [online]. [cit. 2022-03-30]. Dostupné z: <https://www.vincotech.com/technology-innovation/phase-change-material.html>
- [66] T.I.M. PHASE CHANGE MATERIAL. *ShinEtsu* [online]. c2022 [cit. 2022-03-30]. Dostupné z: <https://www.shinetsu.info/product/ti-m-phase-change-material/>

- [67] *An Introduction to PCM Heat Sinks* [online]. c2009-2022, 1.2.2019 [cit. 2022-03-30]. Dostupné z: <https://www.aerodefensetech.com/component/content/article/adt/features/articles/33767>
- [68] Thermal Management for LEDs Beyond Thermal Conductivity Values by Electrolube. *LED professional* [online]. c2001-2022, 1.8.2016 [cit. 2022-03-30]. Dostupné z: <https://www.led-professional.com/resources-1/articles/thermal-management-for-leds-beyond-thermal-conductivity-values-by-electrolube>
- [69] KNAPEC, Jan. ZAMLŽIT, ODMLŽIT: ABY SVĚTLOMETRY VIDĚLY NA CESTU. *Výzkum vývoj automotive* [online]. c2020, 11.9.2020 [cit. 2022-03-30]. Dostupné z: <https://www.vvautomotive.cz/zamlzit-odmlzit-aby-svetlomety-videly-na-cestu/>
- [70] Industry-leading efficacy to optimize headlamp performance. *SAMSUNG* [online]. c1995-2022 [cit. 2022-04-10]. Dostupné z: <https://www.samsung.com/led/automotive/automotive-leds/c-series/>

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

B		Brzdové světlo
BL		Směrové světlo
CFD		Computational Fluid Dynamics – počítačová analýza proudění
ECE		Evropská hospodářská komise
EHK OSN		Předpis Evropské hospodářské komise Organizace spojených národů
HID		High-Intensity Discharge – výboj s vysokou intenzitou
IMS		Insulated Metal Substrate – izolovaný kovový substrát
LED		Light Emitting Diod – dioda emitující světlo
NES		Zadní mlhové světlo
PCB		Printed Circuit Board – deska plošných spojů
PO		Obrysové světlo
PTH		Platned Through Holes – vysázené otvory
RGB		Red, Green, Blue – červená, zelená, modrá
S		Koncové světlo
USA		Spojené státy americké
ZB		Doplňkové brzdové světlo
A	$[-]$	Absorptance
a	$[m \cdot s^{-2}]$	Teplotová vodivost
c_p	$[J \cdot Kg^{-1} \cdot K^{-1}]$	Měrná tepelná kapacita látky při konstantním tlaku
E_0	$[W \cdot m^{-2}]$	Množství energie, kterou vyzáří černé těleso za jednotku času
L	$[m]$	Charakteristický rozměr
n	$[m]$	Jednotkový vektor normály k izotermické ploše
Nu	$[-]$	Nusseltovo číslo
P_{opt}	$[W]$	Optický výkon dodávaný z LED
P_{el}	$[W]$	Elektrický výkon dodávaný do LED

Pr	[-]	Prandltovo číslo
\dot{Q}_{12}	[W]	Tepelný tok mezi dvěma tělesy
T	[-]	Transmitance
T	[K]	Termodynamická teplota
T_w	[K]	Povrchová teplota obtékaného tělesa
T_∞	[K]	Teplota tekutiny ve velké vzdálenosti od obtékaného tělesa
T_2	[K]	Teplota tělesa, který obklopuje menší těleso
T_1	[K]	Teplota teplejšího tělesa, který je obklopován
S	[m ²]	Plocha kolmá k tepelnému toku
S_2	[m ²]	Plocha tělesa, který obklopuje
S_1	[m ²]	Plocha obklopovaného tělesa
\dot{q}	[W·m ⁻²]	Hustota tepelného toku
Q^*	[W·m ⁻³]	Výkon vnitřního zdroje tepla
\dot{Q}	[W]	Tepelný tok
\dot{Q}_w	[W]	Tepelný tok přes stěnu
R_α	[K·m ² ·W ⁻¹]	Tepelný odpor konvekci
R_K	[K·m ² ·W ⁻¹]	Konstantní tepelný odpor
Re	[-]	Reynoldsovo číslo
R	[-]	Reflektance
R_λ	[K·m ² ·W ⁻¹]	Tepelný odpor vedením
R_1	[m ⁻²]	Tepelný odpor záření při obklopení malého tělesa větším
T_j	[K]	Teplota na PN přechodu
T_S	[K]	Teplota na spodní straně desky (v místě dotyku s PCB)
x, y, z	[m]	Souřadnice kartézského souřadného systému
x_w, y_w, z_w	[m]	Souřadnice kartézského souřadného systému na povrchu zdi
ε	[-]	Emisivita

ε_{12}	[-]	Součinitel vzájemné emisivity
η_{opt}	[-]	Optická účinnost LED
λ	$[\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}]$	Součinitel tepelné vodivosti
λ_{max}	[m]	Vlnová délka, kdy je hodnota spektrální hustoty maximální
ν	$[\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}]$	Kinematická viskozita
ρ	$[\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}]$	Hustota
σ_0	$[\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-4}]$	Stefanova – Boltzmannova konstanta
τ	[s]	Čas
ω	$[\text{m}\cdot\text{s}^{-1}]$	Rychlost proudění