



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

LABORATOŘ PŘENOSU TEPLA A PROUDĚNÍ

HEAT TRANSFER AND FLUID FLOW LABORATORY

**VYUŽITIE TEPELNE VODIVÝCH NEKOVOVÝCH
MATERIÁLŮ PRE CHLADIACE SYSTÉMY V
AUTOMOBILOVEJ OSVETĽOVACEJ TECHNICE**

USE OF THERMALLY CONDUCTIVE NON-METALLIC MATERIALS FOR COOLING SYSTEMS IN
AUTOMOTIVE LIGHTING TECHNOLOGY

TÉZA DIZERTČNEJ PRÁCE

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Ing. Martin Zachar

Školiteľ

SUPERVISOR

doc. Ing. Petr Kotrbáček, PhD.

BRNO 2020

Klíčové slová

Pasívny chladič, chladenie, neizotropná tepelná vodivosť, plast

Key Words

Heat sink, cooling, anisotropic thermal conductivity, plastic

Dizertačná práca je dostupná v tlačenej podobe na oddelení vedy a výskumu Fakulty strojního inženýrství Vysokého učení technického v Brně, Technická 2896/2, 616 69 Brno.

Obsah

Kľúčové slová.....	4
Key Words	4
Obsah	3
Úvod	4
1 Plasty s vysokou tepelnou vodivosťou a ich funkčnosť.....	5
1.1 Neizotropnosť tepelnej vodivosti.....	6
2 Návrh geometrie chladičov použitých pre porovnanie efektivity chladenia	7
3 Výroba porovnávaných chladičov	8
4 Meranie chladiacej efektivity chladičov	10
4.1 Vysoko tepelne vodivý – elektricky vodivý plast.....	12
Vtok do dlhej strany základne (rovnobežne s rebrami) – 6 mm rebrá.....	12
4.2 Porovnanie výsledkov vysoko tepelne vodivého – elektricky nevodivého plastu	16
4.3 Výrazne tepelne vodivý – elektricky nevodivý plast	16
5 Návrh geometrie chladiča	18
6 Vplyv emisivity na celkovú efektivitu chladenia pasívneho chladiča	20
6.1 Výpočet tepelného toku chladičom vzhľadom na emisivitu	21
6.2 Vplyv emisivity na chladiacu efektivitu plastového chladiča	23
7 Efektivita chladiča v uzavretom priestore.....	25
8 Návrh plastového chladiča s ohľadom na prenos tepla radiáciou a jeho hmotnosť.....	27
Záver.....	28
Literatúra.....	29
Životopis autora	30
Osobné údaje	30
Vzdelanie	30
Zamestnanie	30
Ďalšie schopnosti a znalosti	30
Abstrakt	31
Abstract	31

Úvod

Plasty sa vo všeobecnosti vyznačujú veľmi nízkou tepelnou vodivosťou, sú elektricky nevodivé a ich samotná štruktúra taktiež nedovoľuje viesť teplo efektívne. Na trhu sa však začali objavovať špeciálne obohatené plastové materiály, ktoré sú schopné viesť teplo až sto násobne viac v porovnaní s klasicky využívanými plastmi. Tento výrazný skok vedie inžinierov po celom svete k myšlienke, že tieto vysoko tepelne vodivé plasty by mohli nahradiť materiály využívané práve na odvod tepla. Tieto štandardné materiály veľmi dobre vyhovujú svojmu účelu, ale v porovnaní s plastmi majú mnoho iných nežiadúcich vlastností ako sú napríklad vysoká hmotnosť, či vysoká výrobná cena.

Dizertačná práca rozoberá problematiku plastových materiálov použitých ako pasívne chladiče a ich problémy, ktoré sú spôsobené najmä vysokou neizotropnosťou tepelnej vodivosti.

Práca porovnáva dve geometrie chladičov, ktoré sa vzájomne líšia hrúbkou rebier. Sú porovnávané dva plastové materiály, jeden elektricky vodivý a druhý elektricky nevodivý, ktorý je ale aj značne menej tepelne vodivý. Tieto chladiče boli vyrobené tromi rôznymi spôsobmi vtoku taveniny do formy. Chladiče sú porovnávané medzi sebou ale aj s hliníkovým náprotivkom.

Ako jeden z hlavných prínosov je predstavená metodika návrhu chladiča s neizotropnou tepelnou vodivosťou, s prepočtom na priemernú vodivosť a kombinácia analytického výpočtu a numerickej simulácie pre stanovenie jeho efektivity.

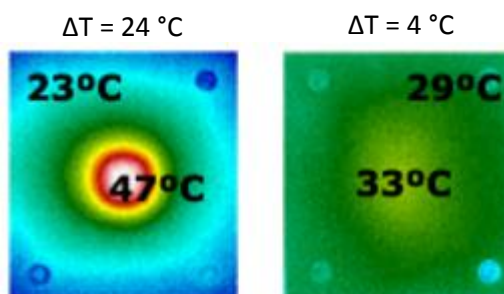
Na záver práca uvádza význam odvodu tepla radiáciou, ktorá je pri navrhovaní plastových chladičov často zanedbávaná, avšak práve v prípade plastových chladičov môže mať veľký význam v určitých aplikáciách a to najmä v neideálnych podmienkach ako môže byť uzavretý stiesnený.

1 Plasty s vysokou tepelnou vodivosťou a ich funkčnosť

Tepelne vodivé plasty, sú plasty upravené tak aby ich tepelná vodivosť bola mnohonásobne vyššia ako u obyčajných plastov. Bežné plasty majú nízku tepelnú vodivosť z dôvodu náhodného usporiadania polymérových reťazcov, iba 0,2 W/m·K, pričom sa teplo najlepšie vedie práve po jednotlivých reťazcoch [1].

U plastov s vysokou tepelnou vodivosťou tvorí polymér základnú maticu, do ktorej sú primiešavané tepelne vodivé prímesi, ktoré majú za cieľ zvyšovanie celkovej tepelnej vodivosti v danom materiáli [2].

Najčastejšími prímiesami sú grafitové vlákna a keramika ako napríklad borón nitrid či aluminium nitrid [3], [4]. Tieto prímesi teda vnášajú do molekulovo náhodne usporiadaných plastov plnivo s pravidelným usporiadaním. Na obr. 1 je možné vidieť porovnanie tepelného poľa u obyčajného plastu a tepelne vodivého plastu od spoločnosti Cool Polymers. Jedná sa o doštičky rozmerov 3x3 palce, s tepelným zdrojom 5 wattov.



Obr. 1 Porovnanie teplotného poľa u bežného plastu (vľavo) a tepelne vodivého plastu (vpravo) [5]

Vďaka týmto prímiesam dokážu mať plastové materiály tepelnú vodivosť až päťsto násobne vyššiu ako normálne neupravené plasty, teda až 100 W/m·K [3]. Táto vodivosť ale nie je ešte úplne bežná a tieto plasty taktiež nie sú komerčne dostupné. Dostupné tepelne vysoko vodivé plasty dosahujú tepelnej vodivosti 30 W/m·K, pri použití 60 % objemu plniva, čo je stokrát viac ako u obyčajných plastov [6], [7]. V tab. 1 je porovnanie rôznych materiálov vzhľadom na ich tepelnú vodivosť.

Tab. 1 Porovnanie rôznych materiálov a ich tepelné vodivosti [5]

Materiál	Tepelná vodivosť [W/m·K]
Penové plasty	0,02
Bežné plasty	0,2
Sklo	2
Tepelne vodivé plasty	1-30
Oceľ	50
Hliník	200
Meď	400
Diamant	1500

Základnými výhodami tepelne vodivých plastov je ich možnosť byť elektricky vodivé alebo nevodivé, podľa použitých prímiesí, ich hmotnosť môže byť až o 50 % nižšia ako hmotnosť hliníku a ponúkajú vyššiu slobodu v oblasti dizajnu geometrie vzhľadom na cenu ich opracovania [5], [4]. Ďalšou ich výhodou je ich tepelná rozťažnosť, ktorá je bližšia súčiastkam, s ktorými sú v kontakte ako u kovov. Nevýhodou môže byť vyššia

cena použitého materiálu, teda ich použitie je vhodné iba v prípadoch produkcie veľkého počtu produktov [4].

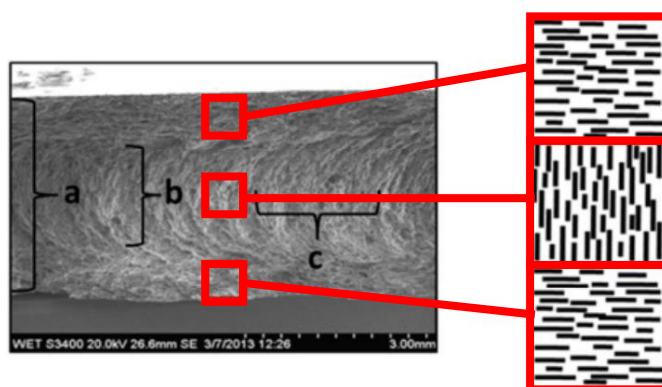
Možnosť využitia tepelne vodivých plastov ako náhradu kovov môže byť v prípade pasívnych chladičov. U týchto chladičov je odvod tepla mnoho krát limitovaný konvekciou a nie kondukciou, keďže dochádza iba ku slabej prirodzenej konvexcii, takže je tvar chladiča viac dôležitý ako jeho materiál. Chladiče použité vo svetlometoch sú príkladom chladičov obmedzených konvekciou, pretože sa nachádzajú uzavreté v malom priestore púzdra svetlometu [4]. Avšak v prípade využitia ventilátorov, pre zvýšenie výkonu chladenia, dochádza k nárastu odvodu tepla konvekciou a tepelná vodivosť súčasne komerčne dostupných vysoko vodivých plastov môže byť príliš nízka a teda limitujúca chladenie.

1.1 Neizotropnosť tepelnej vodivosti

Tepelne vodivé plasty majú ako najväčšiu nevýhodu svoju neizotropnosť, to znamená, že nemajú rovnaké vlastnosti vo všetkých smeroch. Táto vlastnosť je spôsobená pridaným plnivom, ktoré môže mať tvar vlákien či vločiek. Dosiahnutá vysoká tepelná vodivosť je teda vždy iba v smere orientácie tohoto plniva a v smere naň kolmom je nižšia.

Orientácia prvkov plniva je však vždy takmer totožná so smerom tečenia plastu do formy, takže je možná optimalizácia vstrekovania pre čo najlepšiu orientáciu pre konkrétny problém. Táto optimalizácia vtokovej sústavy má ale za následok ďalšie potrebné úpravy formy a to najmä návrh chladenia, ktoré je dôležité pre zachovanie dobrej kvality povrchu výrobkov a rovinnosti.

V [2] bola sledovaná orientácia grafitových vločiek vo vzorke o hrúbke 2 mm a odlišnosť tepelnej vodivosti v jej častiach.



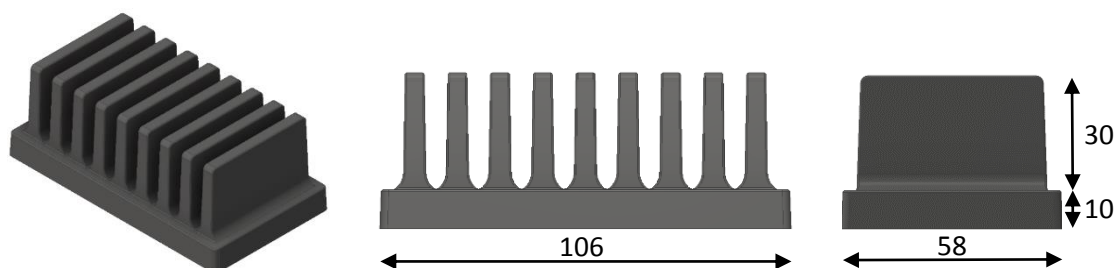
Obr. 2 Orientácia grafitových vločiek s ohľadom na vzdialenosť od steny

Na obr. 2 je ukázaná orientácia grafitových vločiek v priereze vzorku o hrúbke 2 milimetre. Je možné vidieť, že do vzdialenosti 0,5 mm od steny je orientácia v smere plochy vzorku, avšak hlbšie dovnútra sa stáča a uprostred sú jednotlivé vločky orientované kolmo na plochu.

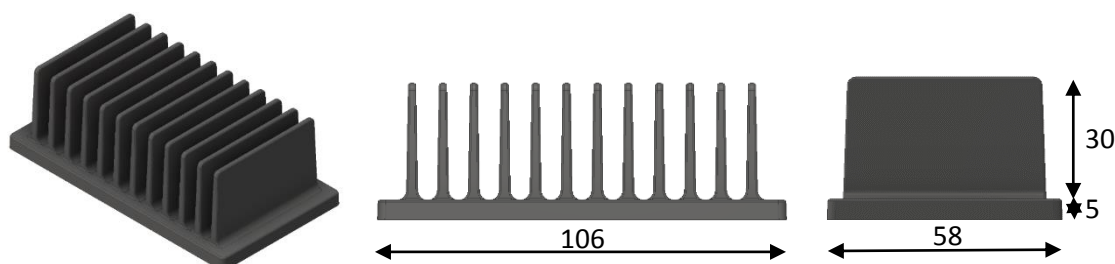
2 Návrh geometrie chladičov použitých pre porovnanie efektivity chladenia

Na základe technologického limitu použitých materiálov boli navrhnuté dve geometrie pasívneho chladiča, v ktorých základný rozdiel bol, že jedna geometria mala 2x širšie rebrá ako druhá. Tieto geometrie následne boli porovnané vzhľadom na svoju efektivitu chladenia. Obe geometrie mali základňu o rozmeroch 106 x 58 mm, líšili sa vo výške základne, kde pre geometriu so širšími rebrami bola základňa z technologických dôvodov vyššia (inak by dochádzalo k jej prepadu). Dĺžka rebier a rovnako tak výška bola nemenná s rozmerom 50 mm, resp. 30 mm. Medzery medzi rebrami boli pevne stanovené na 5 mm. Technologické úkosity však spôsobili, že vo svojich vrchných častiach dosahovali až 6 mm.

Geometria číslo 1 má 9 rebier o šírke 6 mm. Na základe odporúčenia výrobcu materiálu má šírka rebier byť zhruba rovná 2/3 výšky základne (aby nedochádzalo k jej prepadu pri výrobe vzhľadom k veľkému nepomeru), tá bola teda zvolená 10 mm. Geometria číslo 2 má 12 rebier o šírke 3 mm, základňa má výšku 5 mm. Tieto geometrie boli následne mierne upravené o technologické úkosity, pre možnosť výberu chladiča z formy. Tieto geometrie sú zobrazené na obr. 3, resp. obr. 4



Obr. 3 Geometria číslo 1 (6 mm široké rebrá)

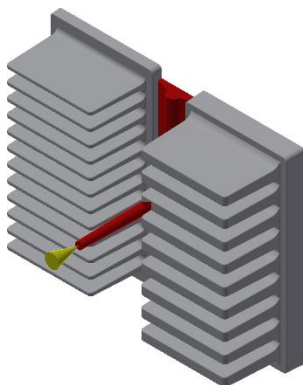


Obr. 4 Geometria číslo 2 (3 mm široké rebrá)

3 Výroba porovnávaných chladičov

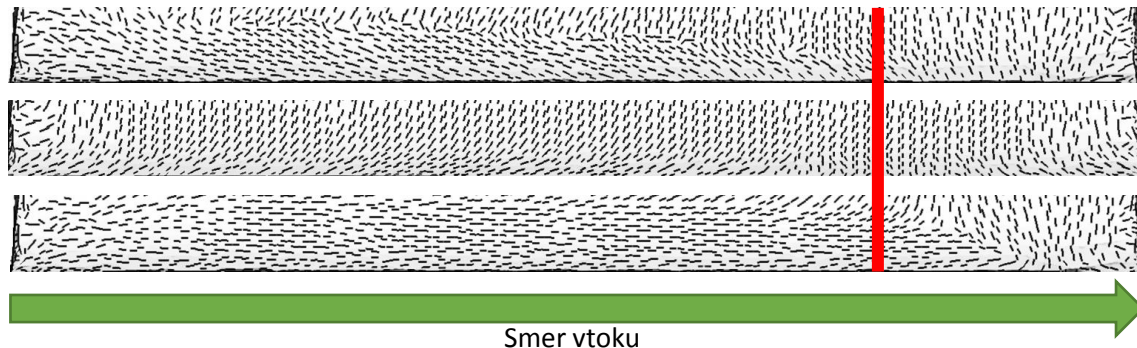
Navrhnuté geometrie boli následne vyrobené tromi spôsobmi, ktoré sa od seba líšili vtokom taveniny do formy. Cieľom bolo porovnať rôznosť efektivity chladenia vzhľadom na smer tečenia taveniny pri výrobe.

Prvý spôsob výroby bol filmový vtok taveniny do dlhšej strany základne, teda rovnobežne s rebrami. Tak ako je ukázané na obr. 5.



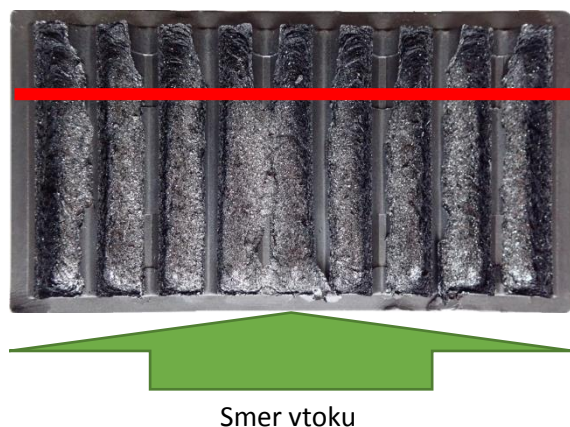
Obr. 5 Filmový vtok taveniny do dlhšej strany základne

Na základe simulácii tečenia taveniny v softvéri CADMOULD je možné si všimnúť odlišnú orientáciu prímеси pozdĺž rebier a to najmä na vzdialenejšom kraji rebier od vstupu taveniny. Na obr. 6 je zobrazená odlišná orientácia prímеси na pravom kraji rebier ako v ich zvyšku. Je možné si všimnúť, že podľa simulácie sa od seba orientácia v jednotlivých rebrách mierne líši taktiež na základe polohy rebra vzhľadom k stredu základne.



Obr. 6 Orientácia prímеси v rebrách pri základni (vtok z dlhej strany základne, rebrá (zhora) 1., 3. a 5.)

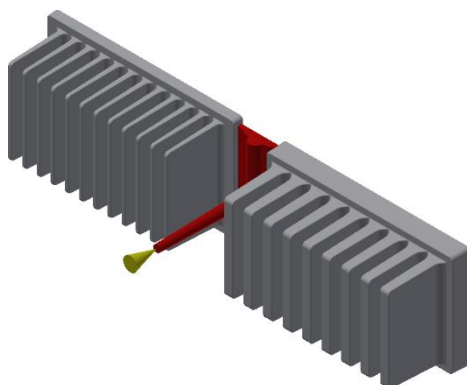
Tento jav bol overený ulomením rebier a následným náhľadom na štruktúru materiálu v mieste lomu u konkrétneho chladiča, tak ako je ukázané na obr. 7.



Obr. 7 Zmena štruktúry materiálu v rebrách pri základni (vtok do dlhej strany základne)

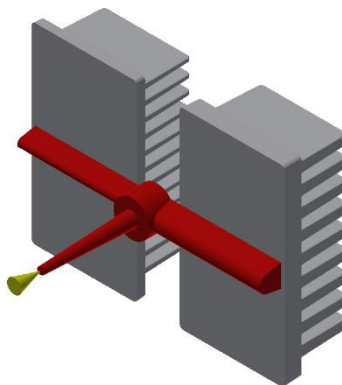
Tento jav môže ovplyvniť celkovú efektivitu chladenia vzhľadom na orientáciu chladiča v priestore, v prípade, že chladič uložíme „hore nohami“, teda kraj rebier ktorý bol navrchu bude na spodu a naopak, tak sa otočí inak vodiaca časť rebier zvrchu/spodku na spo-dok/vrch. Tým sa zmení rozloženie teplôt vzhľadom na prúdiaci vzduch medzi rebrami a je celkovo ovplyvnený tepelný tok z rebier do okolia.

Druhý spôsob vtoku taveniny do formy bol opäť filmový vtok, ale do kratšej strany základne, kolmo k reb-
rám. U tohto typu výroby nemôže dôjsť k zmene efektivity chladenia v závislosti na jeho otočení „hore
nohami“, pretože potenciálne inak vodiaca pravá/ľavá časť sa iba vymenia. Tento typ vtoku je zobrazený
na obr. 8.



Obr. 8 Filmový vtok taveniny do kratšej strany základne

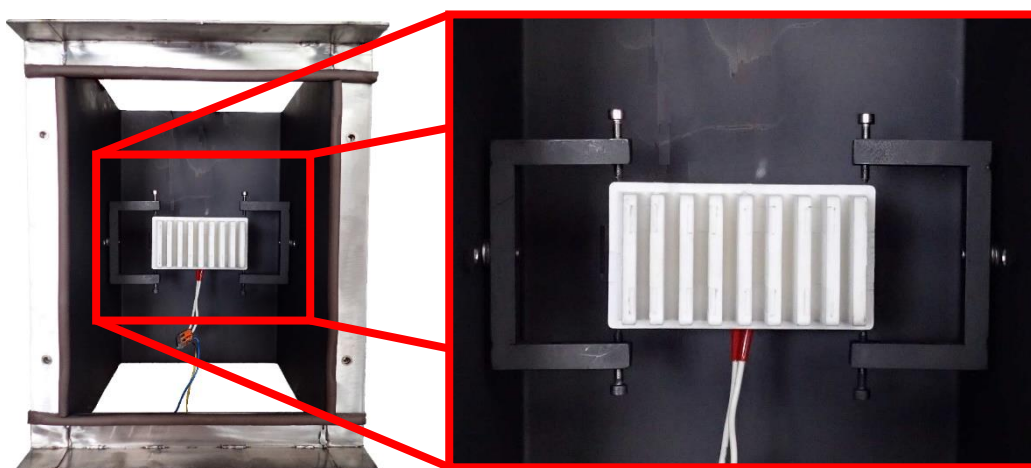
Pre prípad vtoku taveniny do stredu základne bolo možné pozorovať určitú zmenu štruktúru medzi jed-
notlivými rebrami. Z technologických dôvodov nebol vtok do stredu základne urobený priamo, bol by totiž
potrebný medzikus formy, keďže jedna formu slúžila na výrobu oboch geometrii. Vtok do formy bol teda
riešený tak, ako je ukázané na obr. 9.



Obr. 9 Vtok taveniny do stredu základne

4 Meranie chladiacej efektivity chladičov

Vyrobené chladiče boli testované v rovnakých podmienkach za účelom nájdenia najvhodnejšej geometrie a vstupu taveniny do formy, s jednotnou teplotou okolia a totožným tepelným výkonom uprostred základne. Pre experimentálne overenie jednotlivých efektívít chladenia bol vyrobený špeciálny merací box, v ktorom bol chladič uchytený v štyroch bodoch, za cieľom simulovať čo najvhodnejšie podmienky (prirodzená konvekcia nebola priestorom nijako obmedzená a taktiež bolo do-siahnutého minimálneho odvodu tepla vedením do okolia). Toto umiestnenie je ukázané na obr. 10.



Obr. 10 Umiestnenie chladiča v meracom boxe

Box, vyrobený z oceľových plechov o hrúbke 2 mm, mal rozmery 200x200x320 mm a merané chladiče boli umiestnené presne uprostred. Chladiče boli uchytené štyrmi skrutkami, ktoré sa ich dotýkali iba v štyroch bodoch aby sa dosiahlo minimálneho odvodu tepla do tela boxu. Takéto umiestnenie chladiča môže byť výraznou výhodou pre následné numerické simulácie, kde môžeme chladič nechať uložený voľne v priestore. V jednej stene s úchytom chladiča boli taktiež zabudované tri termočlánky, v štvrtine, uprostred a v troch štvrtinách výšky steny boxu, v rovine s úchytom, pre záznam a kontrolu odvodu tepla do stien boxu. Vnútorne steny boxu boli nastriekané grafitovým sprejom, pre jeho známu a vysokú emisivitu (0,95), pre ďalšie zjednodušenie nastavenia numerických simulácií.

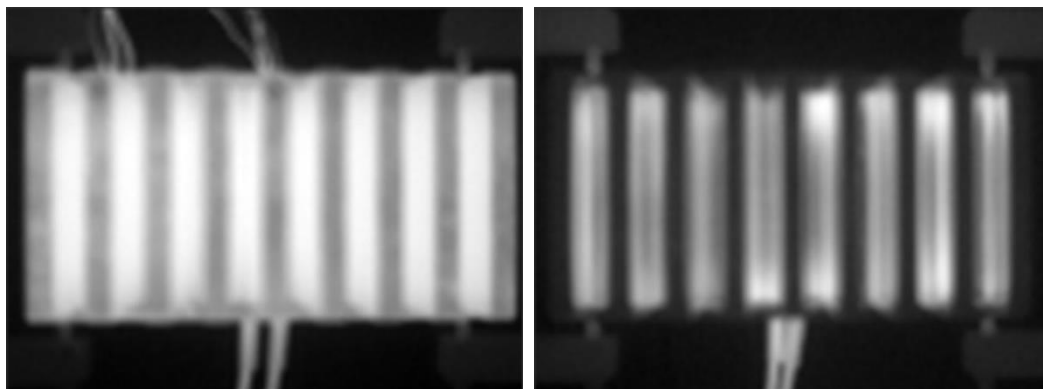
Teplota okolia bola meraná v štyroch miestach odporovými teplomermi PT100, v dolnom otvore uprostred a na kraji a v hornom otvore, taktiež uprostred a na kraji. Tieto teploty ukazovali teplotu okolitého vzduchu na vstupe (dole) a na výstupe (hore). Namerané hodnoty (obzvlášť teplota na výstupe uprostred ako teplota vzduchu opúšťajúca chladič) môžu slúžiť ako prostriedok pre ďalšie lepšie nastavenie numerických simulácií.

Boli merané dve rôzne geometrie a tri rôzne materiály (hliníková zliatina, vysoko tepelne vodivý – elektricky vodivý plast a výrazne tepelne vodivý - elektricky nevodivý plast). Rozdiel medzi oboma geometriami bol v šírke rebier a ich následnom počte. Základný predpoklad pri návrhu hliníkových chladičov totiž je, že väčší počet rebier (pri zachovaní dostatočnej medzery) znamená lepšie chladenie a je teda snaha mať čo najtenšie rebrá. V prípade plastového materiálu toto pravidlo nemusí platiť, vďaka výrazne vyššiemu tepelnému odporu materiálu, ktorý môžeme potlačiť podstatne širšími rebrami.

Hliníkové chladiče boli vyrezané z polotovaru elektroiskrivým drôtovým obrábaním, čo spôsobilo ich neštandardne vysokú emisivitu povrchu, ktorá bola na základe termovízneho merania a známeho teplotného spádu v chladiči (obr. 11) určená ako 0,6. Tieto chladiče boli následne na všetkých svojich plochách vyleštené a ich emisivita, ktorá bola určená rovnakým spôsobom, bola 0,135.

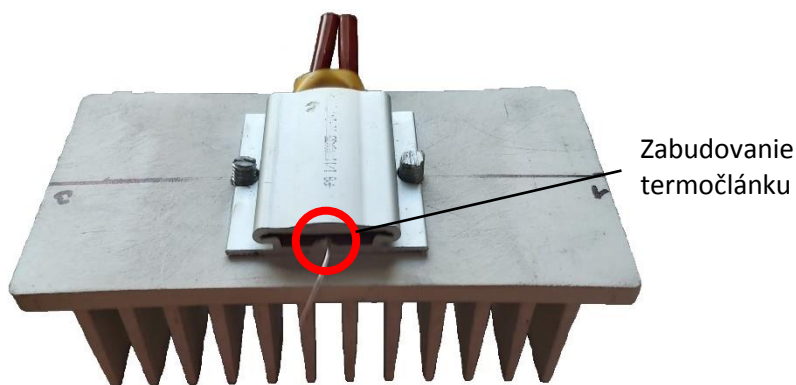
Obr. 11 ukazuje rozdiel v termovíznych snímkach medzi nelešteným a lešteným hliníkovým chladičom. V oboch prípadoch je na termovíznych snímkach výrazne vyššia teplota v medzerách medzi rebrami, sú to

totiž dutiny, tým pádom sa javia ako povrchy s výrazne vyššou emisivitou. Tento efekt je zjavný najmä v prípade lešteného hliníku.



Obr. 11 Porovnanie termovíznych snímok nelešteného hliníkového chladiča, emisivita 0,6 (vľavo) a lešteného hliníkového chladiča, emisivita 0,135 (vpravo)

Použitie ohrievacieho telesa, o rozmeroch 35x40 mm, malo telo z hliníku a bolo napájané laboratórnym zdrojom BK Precision 1901B s maximálnym napätím 32 V, prúdom 30 A a výkonom 960 W. Do ohrievacieho telesa bol zabudovaný termočlánok typu K, ktorého teplota slúžila ako hlavný indikátor efektivity chladienia. Bola predpokladaná konštantná teplota v celom tele ohrievacieho telesa. Ohrievacie teleso bolo vždy teplo vodivou pastou prilepené do stredu základne chladiča, pre minimalizovanie tepelného odporu medzi telesom a telom chladiča. Zaistenie presnej polohy zaisťovali dve skrutky, tak ako je ukázané na obr. 12. V ustálenom stave boli chladiče vyfotené termovíziou FLIR E5, s presnosťou merania $\pm 2^\circ\text{C}$ a rozlíšením 120x90 pixelov, pre zachytenie teplotného poľa na ich povrchu. Boli vykonané termovízne snímky chladiča spredu (z pohľadu rebier) a zvrchu. Meranie každého chladiča bolo vykonané v dvoch polohách, bolo raz zopakované s jeho preklopením o 180° „hore nohami“, pre porovnanie chladiacej efektivity vplyvom odlišnosti orientácie prímеси na koncoch rebier.



Obr. 12 Uloženie ohrievacieho telesa na chladiči

V prípade geometrie 1 a teda rebier so šírkou 6 mm boli taktiež do druhého a piateho (prostredného) rebra zabudované tri termočlánky, v jednej a dvoch tretinách výšky rebier v hĺbke 10 mm a v polovici výšky základne, tak ako je ukázané na obr. 13. Tieto termočlánky slúžili ku kontrole nameraných teplôt a teplotného spádu termovíziou.



Obr. 13 Polohy dier pre termočlánky v druhom a piatom rebre chladiča (vľavo nákres - pohľad z boku, vpravo fotografia skutočného chladiča – pohľad zvrchu)

Pre stanovenie rovnakých podmienok pri jednotlivých meraniach, boli merania vykonané v termostatickej komore, ktorá udržiavala presnú teplotu okolia. Uloženie meracieho boxu v termostatickej komore je ukázané na obr. 14. Otvor uprostred predného krytu boxu bol zakrytý sklom, ktoré sa v prípade vykonávania termovízných snímok odstránilo a bola do otvoru vložená kamera. Všetky merania boli vykonané trikrát, vždy s nanovo nalepeným ohrievacím telesom. Opakovateľnosťou výsledkov bolo zaručené jeho správne nalepenie a dobrý kontakt s chladičom.



Obr. 14 Merací box efektivity chladičov s termovíznou kamerou, uložený v termostatickej polohe

Pre všetky merania bol zvolený jeden tepelný výkon 15 W a teplota okolia 20 °C.

Merania plastových chladičov boli označené ako „geometria“ „vtok“ „materiál“ „poloha“, kde:

Geometria: G1 – geometria 1 s 6 mm širokými rebrami, G2 – geometria 2 s 3 mm širokými rebrami

Vtok: LONG – vtok taveniny do dlhej strany základne, SHORT – vtok taveniny do krátkej strany základne, MID – vtok taveniny do stredu základne

Materiál: EC – elektricky vodivý plast, EI – elektricky nevodivý plast

Poloha: 1, 2 (chladič otočený o 180° - „hore nohami“)

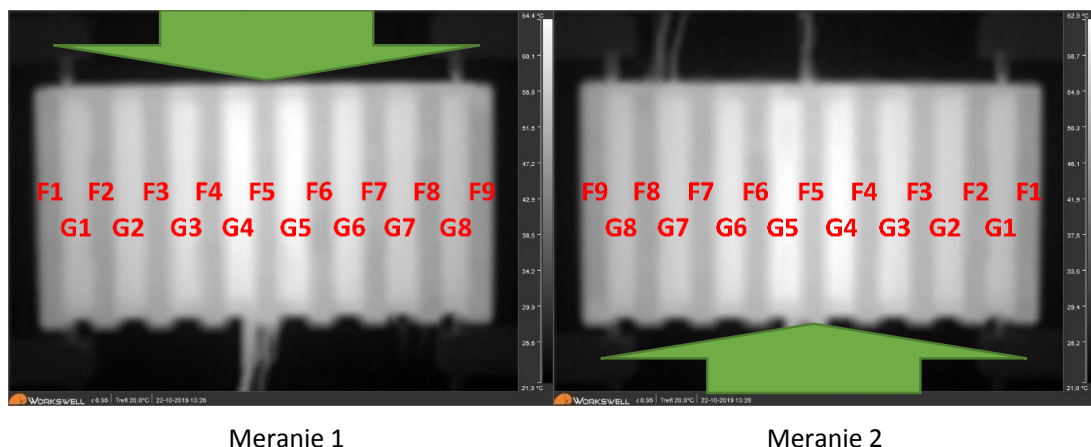
4.1 Vysoko tepelne vodivý – elektricky vodivý plast

Prvý porovnávaný plast, od spoločnosti PolyOne, mal ako vysoko tepelne vodivú prímes grafitové vločky. Základná matrica bola tvorená polyamidom 66. Tento plast má hustotu 1.64 g/cm³, čo ho robí v porovnaní s porovnávanou hliníkovou zliatinou (2,85 g/cm³) o 42 % ľahší. Výrobcom udávaná tepelná vodivosť sa pohybuje v rozmedzí od 4,5-5,5 (kolmo na rovinu usporiadania prímеси) do 19-21 W/m·K (v rovine usporiadania prímеси), v závislosti od orientácie prímеси.

Vtok do dlhej strany základne (rovnobežne s rebrami) – 6 mm rebrá

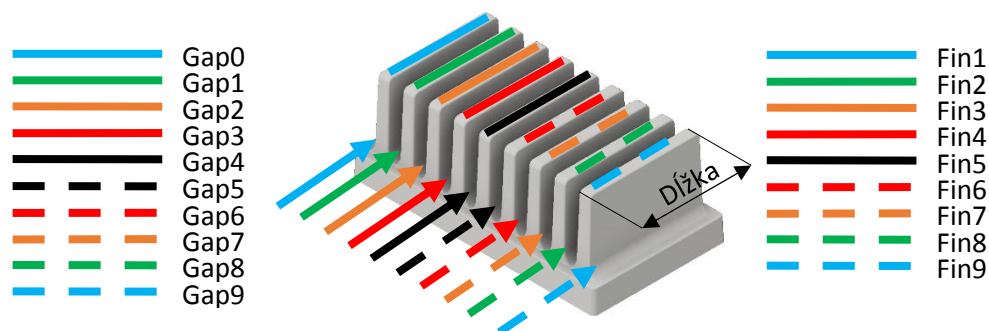
Boli vykonané dva typy meraní s pôvodnou polohou (Meranie 1) a otočením chladiča o 180° (Meranie 2), kde je možné si všimnúť výraznej zmeny efektivity chladenia. Na konci oboch meraní, teda po dosiahnutí ustáleného stavu, boli zhotovené termovízne snímky chladiča pre porovnanie rozloženia teplotného poľa na rebrách a v medzerách medzi nimi.

Na obr. 15 je zobrazená termovízna snímka chladiča v oboch meraných polohách. Vývoj teploty na rebrách a v medzerách bol vždy uvažovaný od spodnej hrany chladiča smerom k vrchnej. Označenie rebier a medzier zostávalo aj po preklopení chladiča, tak ako je na obrázku.

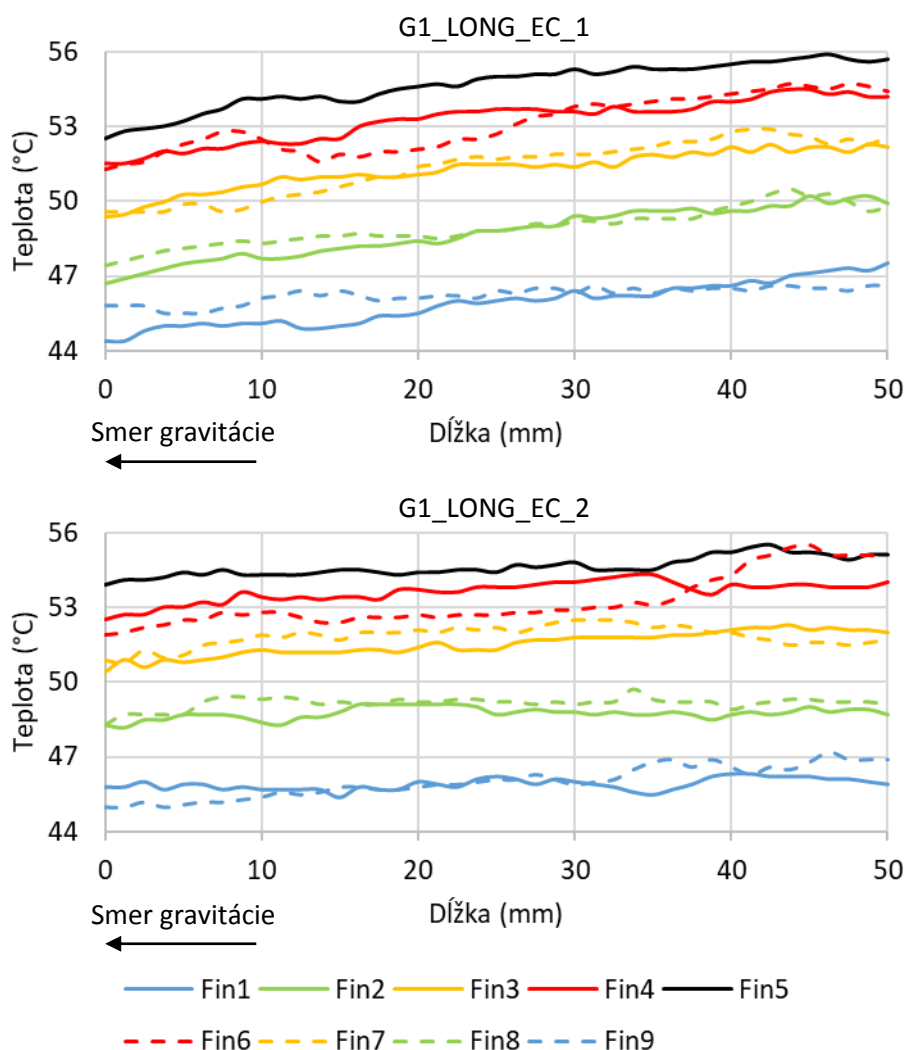


Obr. 15 Termovízne snímky meraného chladiča s označeným smerom vtoku taveniny (zelená šípka) a s označenými rebrami a medzerami

Na obr. 17 je zobrazený priebeh teplôt pozdĺž rebier od spodného okraja až po horný, teda proti smeru gravitácie, medzi oboma meraniami. Rebrá 1-9 sú označené Fin1-Fin9. Priebehy teplôt na rebrách sú od seba odlíšené farbou krivky s ohľadom na vzdialenosť od stredu chladiča. Napríklad plná modrá krivka reprezentuje prvé najkrajnejšie rebro a čiarkovaná modrá krivka reprezentuje posledné rebro na opačnom okraji. Rovnaké porovnanie rozloženia teplôt bolo vykonané aj pre medzery medzi nimi. Medzery sú označené Gap0-Gap9, kde medzery Gap0 a Gap9 sú vonkajšie okraje krajných rebier. Toto značenie je vizuálne ukázané na obr. 16.



Obr. 16 Systém označenia jednotlivých rebier a medzier medzi nimi v grafoch popisujúcich rozloženie teplotného poľa na nich



Obr. 17 Porovnanie vývoja teploty pozdĺž rebier u oboch meraní chladiča so 6 mm rebrami, vtok do dlhej strany základne (rovnobežne s rebrami)

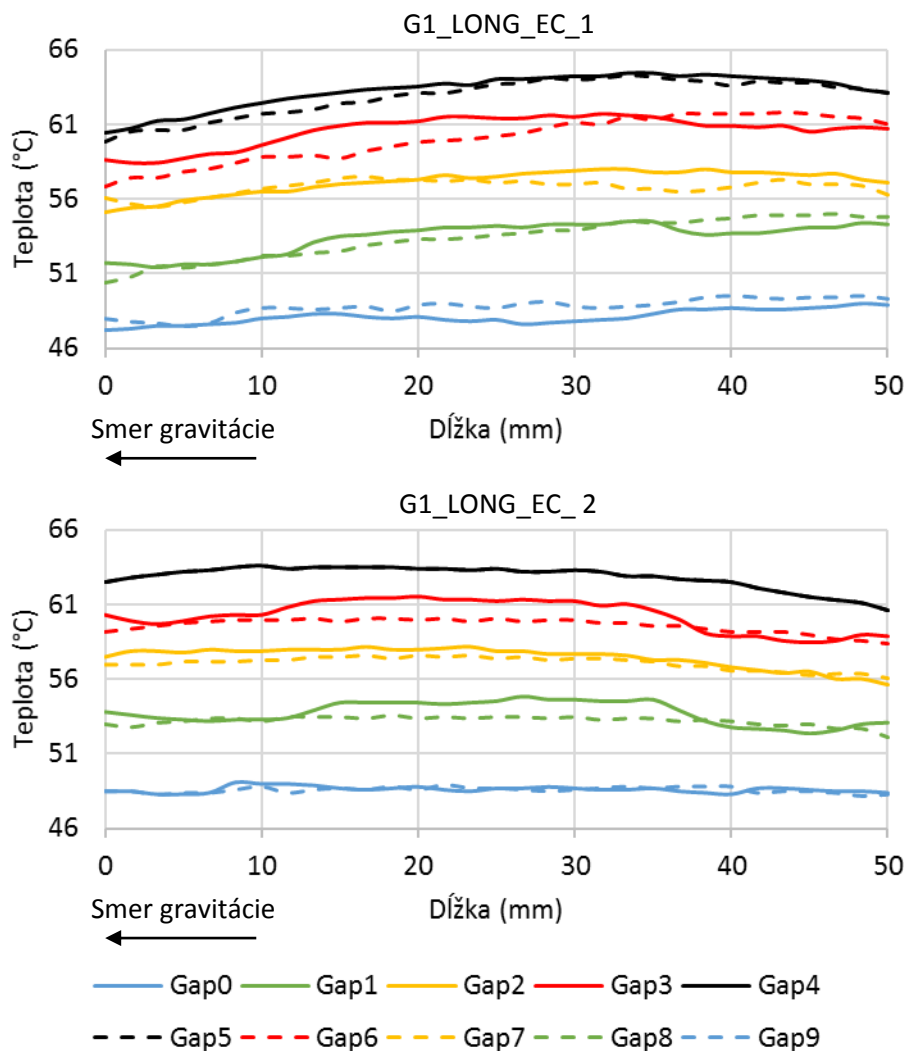
Je možné vidieť výrazný nárast teploty pozdĺž rebier v prvom meraní, kdežto v prípade druhého merania je teplota výrazne stabilnejšia. V prípade chladiča s izotropnou tepelnou vodivosťou je predpokladaný vývoj teploty v smere proti gravitácii narastajúci, z dôvodu menšieho teplotného gradientu medzi ohrievaným vzduchom prúdiacim nahor a chladičom a teda menším odvodom tepla vo vrchných častiach chladiča.

V Tab. 2 je porovnaná priemerná teplota na koncoch rebier v oboch meraniach. Je vidieť, že v prípade druhého merania je teplota mierne vyššia, avšak tieto rozdiely sú všeobecne malé a môže sa jednať z veľkej časti o chybu merania termovízie.

Tab. 2 Priemerná teplota na rebrách pre chladič so 6 mm rebrami a vtokom do dlhej strany základne

Rebro	Fin1	Fin2	Fin3	Fin4	Fin5	Fin6	Fin7	Fin8	Fin9
G1_LONG_EC_1 Teplota (°C)	45,9	48,7	51,3	53,3	54,7	53,1	51,4	49,0	46,2
G1_LONG_EC_2 Teplota (°C)	45,9	48,7	51,5	53,6	54,6	53,3	51,9	49,2	46,0

Na obr. 18 je zobrazený vývoj teplôt v medzerách medzi rebrami. Je vidieť obdobné chovanie ako u rebier, s tendenciou teploty klesať pri vrchnom okraji chladiča. V prípade druhého merania má vyššia polovica dokonca mierne nižšiu teplotu ako spodná. Vyvýšené miesta uprostred medzier sú miesta, kde bolo z druhej strany základne uložené ohrievacie teleso.



Obr. 18 Porovnanie vývoja teploty pozdĺž medzier medzi rebrami u oboch meraní chladiča so 6 mm rebrami, vtok do dlhej strany základne (rovnobežne s rebrami)

Tab. 3 Priemerná teplota v medzerách medzi rebrami pre chladič so 6 mm rebrami a vtokom do dlhej strany základne

Medzera	Gap0	Gap1	Gap2	Gap3	Gap4	Gap5	Gap6	Gap7	Gap8	Gap9
G1_LONG_EC_1 Teplota (°C)	48,1	53,4	57,1	60,6	63,2	62,8	60,0	56,8	53,4	48,8
G1_LONG_EC_2 Teplota (°C)	48,6	53,7	57,5	60,3	62,8	62,8	59,6	57,1	53,2	48,6

Tab. 3 ukazuje priemerné teploty v medzerách. Je vidieť, že teploty sú veľmi podobné iba s miernymi odchýlkami, nikdy viac ako 1 °C.

Obdobne boli premerané chladiče ostatných vtokov a druhej geometrie.

4.2 Porovnanie výsledkov vysoko tepelne vodivého – elektricky nevodivého plastu

V tab. 4 sú zobrazené teploty ohrievacieho telesa pre merania oboch geometrií. V prípade dvoch rozdielnych geometrií dochádza u hliníku k očakávanému rozdielu chladiacej efektivity v prospech geometrie s väčším počtom rebier. V prípade plastových chladičov je vidieť, že geometria s tenšími rebrami je menej účinná napriek väčšiemu počtu rebier a väčšej teplonosnej ploche a to z dôvodu vyššieho tepelného odporu spôsobeného tenkosťou rebier a základne.

Ďalej je taktiež výrazný rozdiel medzi jednotlivými spôsobmi vstrekovania plastu do formy, kde sa ukazuje vtok z dlhej strany základne ako najvhodnejší. Zároveň ale pri tejto geometrii dochádza k výraznej zmene efektivity chladenia vplyvom orientácie chladiča. Rozdiel teplôt na ohrievacom telese bol 2,8 °C. Táto zmena sa prakticky neprejavila pri ostatných spôsoboch vstrekovania, pretože pri otočení chladičov nedochádzala k zmene orientácie prímеси vzhľadom na prúdiaci vzduch.

Tab. 4 Porovnanie chladiacej efektivity hliníkových a plastových (elektricky vodivých) chladičov

Materiál	Geometria	Vtok	Poloha	Hmotnosť (g)	Teplota zdroja (°C)
Hliník (neleštený/ /semileštený/ /leštený)	1 (6 mm rebrá)	-	-	387	59,6/63,4/64,2
	2 (3 mm rebrá)	-	-	216	57,5/59,6/59,9
Vysoko tepelne vodivý –elektricky vodivý plast		Dlhá strana	1	223	72,3
		základne	2	223	69,5
	1 (6 mm rebrá)	Krátka strana	1	223	76,2
		základne	2	223	76,1
		Stred	1	223	76,1
		základne	2	223	76,3
		Dlhá strana	1	124	78
		základne	2	124	76,4
	2 (3 mm rebrá)	Krátka strana	1	124	77,9
		základne	2	124	77,9
		Stred	1	124	77,3
		základne	2	124	77,9

Jednoznačne najlepší variant je teda chladič vyrobený vtokom do dlhšej strany základne (rovnobežne s rebrami), a to v prípade oboch uložení, správnym uložením môžeme však doceliť ešte vyššiu efektivitu. V prípade 3 mm širokých rebier a vtoku do dlhšej strany základne, chladič neukazuje výrazne lepšiu chladiacu efektivitu, to je ale s vysokou pravdepodobnosťou spôsobené nekvalitnou výrobou.

4.3 Výrazne tepelne vodivý – elektricky nevodivý plast

Druhý porovnávaný plast, od spoločnosti PolyOne, má ako vysoko tepelne vodivú prímесь elektricky nevodivé minerály. Základná matrica je opäť tvorená polyamidom 66. Tento plast má hustotu 2,41 g/cm³, čo ho robí v porovnaní s hliníkom (2,85 g/cm³) o 15 % ľahší. Výrobcom udávaná tepelná vodivosť sa pohybuje v rozmedzí od 1,2 do 1,5 W/m·K, v závislosti od orientácie plniva.

Pre tento plast bolo vykonané rovnaké porovnanie ako pre plast elektricky vodivý. V tab. 35 sú zobrazené teploty ohrievacieho telesa pre merania oboch geometrií. Tepelný výkon sa medzi dvomi meranými geometriami odlišoval a jeho hodnota je uvedená pri teplote ohrievacieho telesa. V prípade geometrie 1 so

6 mm širokými rebrami bolo opäť napätie na ohrievacom telese zvolené 15 W. Pre geometriu číslo dva bol tepelný výkon nastavený iba na 10 W, z dôvodu výšky generovaného napätia na zdroji (so stúpajúcou teplotou na telese, klesal elektrický prúd a napätie muselo stúpať pre zachovanie výkonu) a neschopnosťou použitého zdroja generovať dostatočné napätie. Geometria s tenšími rebrami je teda výrazne menej účinná napriek väčšiemu počtu rebier a väčšej teplonosnej ploche, z dôvodu vysokého tepelného odporu spôsobeného tenkosťou rebier a základne.

Rozdiel medzi jednotlivými spôsobmi vstrekovania plastu do formy nie je pri tomto materiáli tak dôležitý ako v prípade elektricky vodivého materiálu. Opäť sa ale ukazuje istá neizotropnosť, ktorá je však výrazne menšia (vodivosť je v rozmedzí 1,2 - 1,5 W/m·K), a teda výhoda mať chladič vyrobený vtokom taveniny do dlhšej strany základne. Pri tomto chladiči ale opäť nastal rozdiel v efektívite chladenia vzhľadom na jeho polohu, kde rozdiel teplôt na ohrievacom telese bol 1,8 °C.

Tab. 5 Porovnanie chladiacej efektivity hliníkových a plastových (elektricky nevodivých) chladičov

Materiál	Geometria	Vtok	Poloha	Hmotnosť (g)	Teplota zdroja (°C)
Hliník (neleštený/ /semileštený/ /leštený)	1 (6 mm rebrá)	-	-	387	59,6/63,4/64,2 (15 W)
	2 (3 mm rebrá)	-	-	216	48,6/49,3/50,2 (10 W)
Výrazne tepelne vodivý – elektricky nevodivý plast		Dlhá strana	1	328	101,2 (15 W)
		základne	2	328	99,4 (15 W)
	1 (6 mm rebrá)	Krátka strana	1	328	102,4 (15 W)
		základne	2	328	101,5 (15 W)
		Stred	1	328	101,2 (15 W)
		základne	2	328	99,6 (15 W)
		Dlhá strana	1	182	85,7 (10 W)
		základne	2	182	85,2 (10 W)
	2 (3 mm rebrá)	Krátka strana	1	182	86,3 (10 W)
		základne	2	182	86 (10 W)
		Stred	1	182	87,8 (10 W)
		základne	2	182	87,6 (10 W)

5 Návrh geometrie chladiča

Táto kapitola popisuje možnosť návrhu pasívneho chladiča s predikciou teploty tepelného zdroja. Tento návrh je založený na odhade teploty chladeného zdroja tepla, z ktorého je následne analyticky vypočítaný súčiniteľ prenosu tepla z chladiča do okolia, ktorý je ďalej použitý do numerickej simulácie, pre overenie správnosti počiatočného odhadu. Tepelná vodivosť materiálu sa určí výpočtom popísaným v tejto kapitole. Postupnou iteráciou očakávanej teploty zdroja tepla sa dopracujeme k jeho skutočnej hodnote, tým že teplota zo simulácie bude rovná očakávanej teplote. Najväčšia výhoda tohoto prístupu spočíva v presnosti odhadu priemernej tepelnej vodivosti a rýchlosti samotného výpočtu, nejedná sa totiž o výpočet prúdenia, súčiniteľ prestupu tepla je stanovený analytickým výpočtom.

Výpočet bol opäť vykonaný [8].

Zvolené parametre pre výpočet:

Šírka chladiča: $W = 0,1$ m

Dĺžka chladiča: $L = 0,05$ m

Teplota základne rebra: t_b = premenlivá

Teplota okolia: $t_{ok} = 20$ °C

Medzery medzi rebrami sú dané už navrhnutou geometriou, ich šírka sa pohybuje od 5 mm do 6mm vplyvom technologických úkosov. Bola preto zvolená priemerná hodnota:

$$z = 0,0055 \text{ m} \quad (1)$$

Výpočet súčiniteľa prestupu tepla medzi dvomi rebrami:

Rayleighovo číslo Ra (vlastnosti vzduchu sa v každom výpočte menia, v závislosti na zvolenej teplote základne, tieto vlastnosti boli prebrané z [9]):

$$Ra = \frac{g \cdot \beta_{vzd} \cdot \theta \cdot z^3}{\nu_{vzd} \cdot \alpha_{vzd}} \quad (2)$$

Elenbaasovo číslo El :

$$El = Ra \cdot \frac{z}{L} \quad (3)$$

Súčiniteľ prestupu tepla medzi rebrami h :

$$h = \frac{k_{vzd}}{z} \cdot \left(\frac{576}{El^2} + \frac{2,873}{El^{\frac{1}{2}}} \right)^{-\frac{1}{2}} \quad (4)$$

Táto hodnota sa následne vezme a dosadí sa v numerickej simulácii na celý povrch chladiča.

V prípade plastového materiálu s tepelnou vodivosťou 20/5 W/m·K v závislosti od orientácie plniva musela byť z dôvodu nemožnosti odhadu premenlivosti orientácie plniva zvolená iba jedna tepelná vodivosť. K výpočtu tejto vodivosti môžeme postupovať zistením určitej priemernej vodivosti. Pri predstave, že materiál vedie v dvoch smeroch teplo s vodivosťou 20 W/m·K a v jednom smere s vodivosťou 5 W/m·K je možný pokus o nájdenie jedného vektora, ktorého dĺžka by stanovila priemernú vodivosť.

Keďže je pre priemerné vedenie tepla v materiáli výrazne dôležitejšia spodná hranica tepelnej vodivosti, ktorá celkovú tepelnú vodivosť brzdí, bol uvažovaný výpočet s dosadením tepelných odporov namiesto tepelných vodivostí. Tepelné odpory sú rovné obráteným hodnotám vodivostí a rovnica pre výpočet teda vyzerá nasledovne:

$$\sqrt{\frac{1}{d^2} + \frac{1}{d^2} + \frac{1}{d^2}} = \sqrt{\frac{1}{a^2} + \frac{1}{b^2} + \frac{1}{c^2}} \quad (5)$$

Po úpravách:

$$d = \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{3a^2} + \frac{1}{3b^2} + \frac{1}{3c^2}}} = 8,2 \quad (6)$$

Získaná hodnota taktiež spadá do intervalu maximálnej a minimálnej tepelnej vodivosti použitého materiálu a je výrazne bližšie minimálnej tepelnej vodivosti. Po jej použití v simuláciách sa ukázalo, že ich výsledky sú veľmi blízke nameraným výsledkom.

Pre prípad druhého materiálu s výrazne nižšou tepelnou vodivosťou nie je možné tento postup použiť, analytický výpočet na začiatku návrhu predpokladá rovnakú teplotu zdroja tepla a základne u rebier, v tomto prípade je ale príliš odlišná a nehomogénna.

V každej simulácii bol totožný tepelný tok v mieste zdroja tepla a to 15 W, rovnako ako v meraniach. Na základe známych teplôt z termočlánkov použitých pri meraniach geometrie 1, bola známa teplota na konci meraných rebier a následne odvodená emisivita hliníkových chladičov. Na medzi-rebrové povrchy bol aplikovaný model výpočtu prenosu tepla pomocou radiácie „Surface to Surface“, na všetky ostatné povrchy bol použitý model „To Ambient“.

Ďalšie parametre simulácií a výsledky sú v tab. 6:

Tab. 6 Parametre simulácií pre návrh chladiča a ich výsledky

Geometria	1. variant (6 mm rebrá)		2. variant (3 mm rebrá)	
Materiál	Hliník (AlCuMgPb) neleštený/semileštený/leštený	Plast	Hliník (AlCuMgPb) neleštený/semileštený/leštený	Plast
Vodivosť (W/m·K)	130	8,2	130	8,2
Emisivita povrchu	0,6/0,135	0,95	0,6/0,135	0,95
Vypočítaná teplota zdroja (°C)	58,4/63,5/65,2	70,8	56,6/60,0/61,9	74,3
Priemerná nameraná teplota zdroja (°C)	59,4/63,4/64,2	70,9*	57,5/59,6/59,9	77,2*
Rozdiel simulácie od merania (°C)	-1,0/+0,1/+1,0	-0,1	-0,9/-0,4/-2,0	-2,9

*Pre porovnanie výsledkov zo simulácie s reálnym meraním bol použitý priemer meraní chladičov s vtokom taveniny do dlhej strany základne.

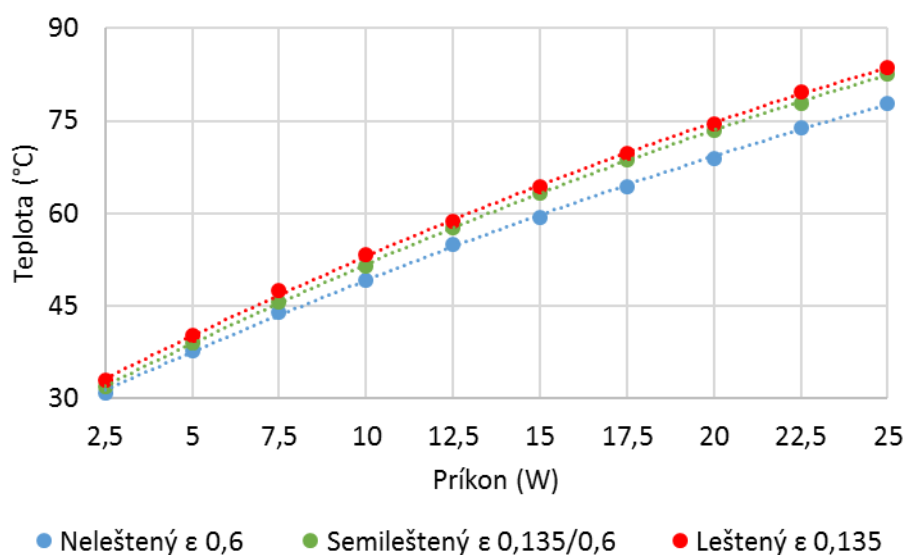
Z uvedených výsledkov je vidieť vysoká presnosť použitej metódy. Najväčšia odchýlka je v prípade plastového chladiča s 3 mm hrubými rebrami v prospech simulácie. Tento výraznejší rozdiel je pravdepodobne spôsobený nekvalitne vyrobenými.

6 Vplyv emisivity na celkovú efektivitu chladienia pasívneho chladiča

V porovnaní výsledkov v predchádzajúcej kapitole sú uvedené teploty ohrievacieho telesa pre hliníkové chladiče s rôznou úpravou povrchu a teda s rôznou emisivitou. Z výsledkov je vidieť, že emisivita povrchu má vplyv na celkovú chladiacu efektivitu chladiča. Tento vplyv je malý, avšak nezanedbateľný v aplikácii, kde každý stupeň Celzia je dôležitý. V aplikácii ako sú automobilové svetlomety, kde odvod tepla konvekciou je vďaka stiesnenému priestoru svetlometu značne obmedzený môže mať odvod tepla radiáciou ešte väčší význam. Skúmané plastové chladiče majú práve v porovnaní s klasicky využívanými materiálmi ako jednu z najdôležitejších výhod svoju vysokú emisivitu.

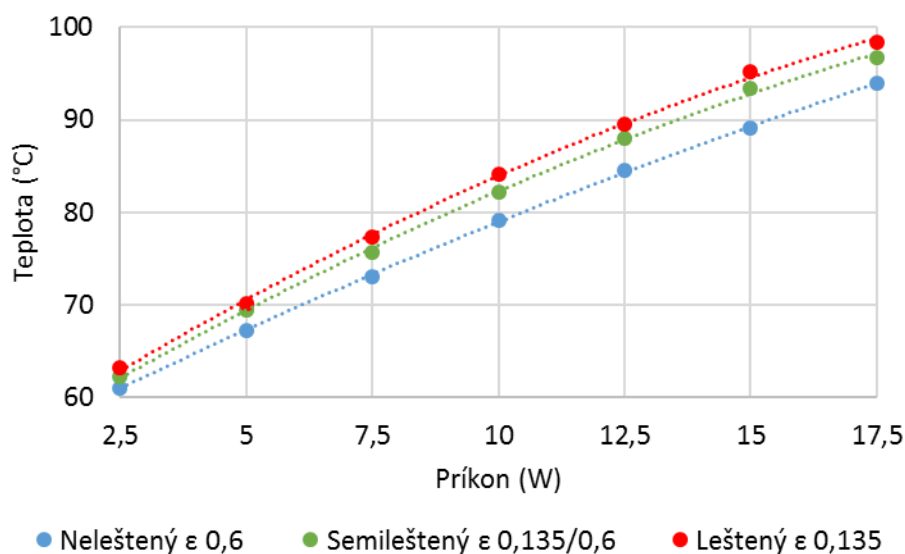
Z tohto dôvodu boli obe geometrie hliníkového chladiča premerané s rôznymi výkonmi (s krokom 2,5 W) za účelom dosiahnutia odlišných rozdielov teploty povrchu a okolia a teda vplyvu zmeny odvodu tepla konvekciou a radiáciou v závislosti od ΔT . Boli premerané hliníkové chladiče s vysokou emisivitou povrchu 0,6, chladiče vyleštené na svojich vonkajších plochách s emisivitou 0,135 a chladiče vyleštené taktiež v medzi-rebrovom priestore za účelom preukázania dôležitosti emisivity aj na týchto plochách. Merania boli vykonané pri dvoch teplotách okolia 20 a 50 °C, pretože prenos tepla radiáciou rastie so štvrtou mocninou teploty a dá sa teda očakávať väčší vplyv pri vyšších teplotách okolia.

Na obr. 19 je ukázaný nárast teploty ohrievacieho telesa v závislosti na výške elektrického príkonu pre geometriu s rebrami širokými 6 mm a pre teplotu okolia 20 °C. Je možné si všimnúť nelineárneho nárastu teploty ale aj výrazného nárastu teploty ohrievacieho telesa, pri vyleštení vonkajších plôch chladiča. Pri vyleštení medzi-rebrových plôch došlo k ďalšiemu nárastu teploty, avšak už nie tak výraznému, tieto plochy tvoria dutinu a preto sa ich emisivita prakticky javí ako vyššia než v skutočnosti je.



Obr. 19 Nárast teploty ohrievacieho telesa u hliníkových chladičov pri rôznych úpravách povrchu pri teplote okolia 20 °C

Rovnaké porovnanie bolo vykonané aj pre teplotu okolia 50 °C a výsledky z neho sú ukázané na obr. 20. Maximálny výkon bol iba 17,5 W z dôvodu vysokej teploty ohrievacieho telesa a teda nízkeho elektrického prúdu, ktorý použitý zdroj nebol schopný vykompenzovať napätím.



Obr. 20 Nárast teploty ohrievacieho telesa u hliníkových chladičov pri rôznych úpravách povrchu pri teplote okolia 50 °C

Zo všetkých kriviek je taktiež vidieť utlmujúci nárast teploty ohrievacieho telesa s rovnakým krokom nárastu tepelného výkonu. Je to spôsobené nárastom odvodu tepla radiáciou so štvrtou mocninou teploty chladiča.

6.1 Výpočet tepelného toku chladičom vzhľadom na emisivitu

Pre výpočet tepelného toku radiáciou je potrebné najskôr vypočítať hustotu q_{rad} . Tú zistíme z nasledujúcej rovnice [10]:

$$q_{rad} = \frac{\sigma}{\frac{1}{\epsilon} + \frac{1}{\epsilon_{ok}} + 1} \cdot (T^4 - T_{ok}^4) \quad (7)$$

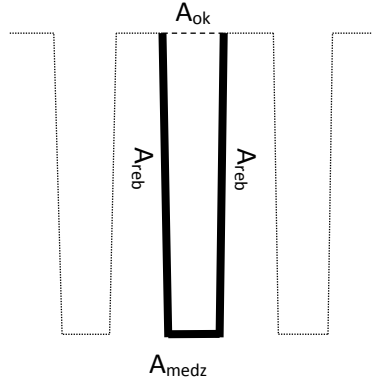
Kde σ je Stefan-Boltzmannova konštanta s hodnotou $5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^2 / \text{K}^4$, ϵ_{ok} je emisivita okolitých povrchov, T_{ok} je teplota okolia, T je teplota chladiča a ϵ je jeho emisivita.

Pre výpočet celkového tepelného toku radiáciou je potrebné zistiť súčiniteľ prestupu tepla radiáciou, ten si môžeme zadefinovať ako hustotu tepelného toku podelenú ΔT .

$$h_{rad} = \frac{q_{rad}}{\Delta T} \quad (8)$$

Tento súčiniteľ je ale odlišný pre voľné vonkajšie plochy a pre plochy v medzi-rebrových priestoroch, ktoré sa chovajú ako dutiny.

Pre výpočet súčiniteľa prestupu tepla radiáciou z medzi-rebrových priestorov je potrebné najskôr vypočítať uhlový súčiniteľ. Pokiaľ sa bližšie pozrieme na priestor medzi rebrami, je možné okolie, kam je vyžarované teplo z tohto priestoru, nahradiť plochou A_{ok} . Schematické zobrazenie je ukázané na obr. 21.



Obr. 21 Plochy pre výpočet uhlového súčiniteľa

Podľa rovníc uvedených v [10] a ich následných úpravách získame tento faktor nasledovne:

$$A_{ok} \cdot (F_{ok \rightarrow reb} + F_{ok \rightarrow medz} + F_{ok \rightarrow reb}) = (A_{reb} + A_{medz} + A_{reb}) \cdot F_{reb+medz+reb \rightarrow ok} \quad (9)$$

Kde A_{ok} je náhradná plocha reprezentujúca okolie, A_{reb} je plocha rebra, A_{medz} je plocha medzery, $F_{ok \rightarrow reb}$ je uhlový súčiniteľ radiácie okolie $\rightarrow$ rebro, $F_{ok \rightarrow medz}$ je uhlový súčiniteľ radiácie okolie $\rightarrow$ medzera a $F_{reb+medz+reb \rightarrow ok}$ je uhlový súčiniteľ radiácie celého medzi-rebrového priestoru $\rightarrow$ okolie.

V uzavretom priestore je súčet uhlových súčiniteľov z jednej plochy na všetky ostatné rovný 1 a po úpravách teda dostaneme:

$$F_{reb+medz+reb \rightarrow ok} = \frac{A_{ok}}{A_{reb} + A_{medz} + A_{reb}} \quad (10)$$

A súčiniteľ prestupu tepla radiáciou v medzi-rebrových priestoroch je teda:

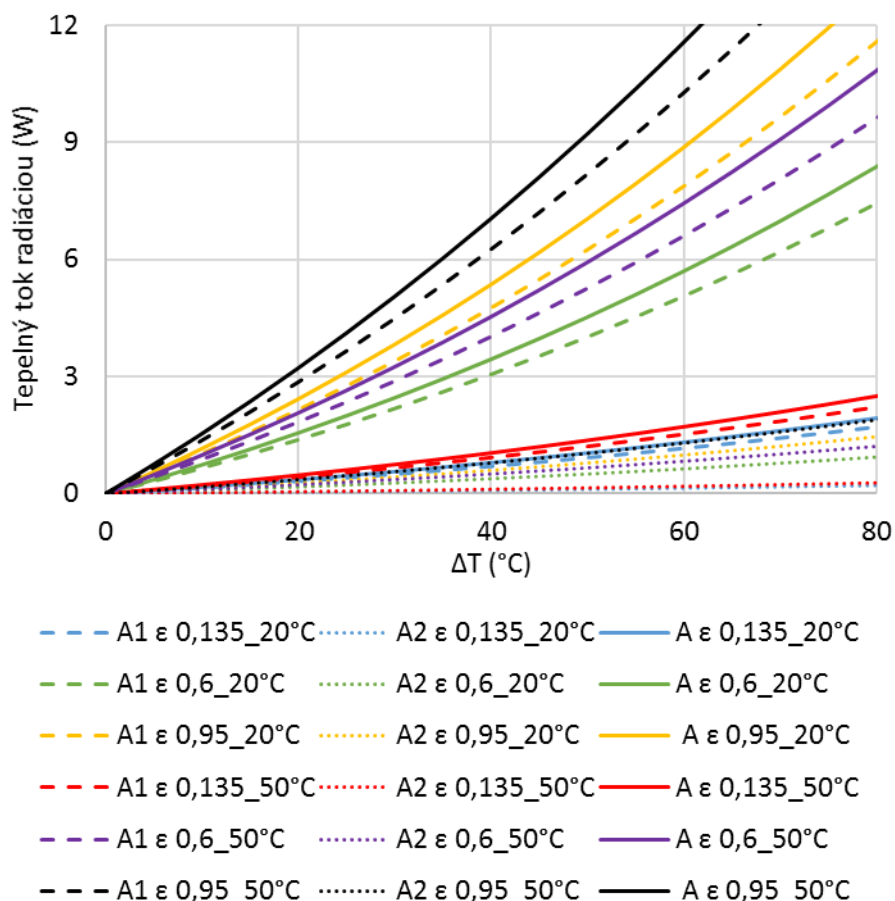
$$h_{rad_m} = F_{reb+medz+reb \rightarrow ok} \cdot \frac{q_{rad}}{\Delta T} \quad (11)$$

Pri známom súčiniteli prestupu tepla radiáciou môžeme vypočítať celkový tepelný tok radiáciou z vonkajších, medzi-rebrových plôch a z celého chladiča dohromady.

$$Q_{rad} = h_{rad} \cdot A_i \cdot \Delta T = q_{rad} \cdot A_i \quad (12)$$

Kde A_i je plocha pre ktorú tepelný tok počítame.

Tepelné toky pre obe geometrie, obe teploty okolia a emisivity 0,135, 0,6 a 0,9 sú na obr. 22.



Obr. 22 Tepelné toky radiáciou pre geometriu 1, vonkajšie plochy chladičov A1, medzi-rebrové plochy A2, celkovú plochu A a pre emisivity 0,135, 0,6 a 0,95

6.2 Vplyv emisivity na chladiacu efektivitu plastového chladiča

V predchádzajúcej podkapitole bol ukázaný výrazný nárast tepelného toku radiáciou vplyvom vyššej emisivity povrchu chladiča. Hliníkový chladič s emisivitou 0,6 vyžaroval mnohonásobne viac tepla ako chladič s emisivitou iba 0,135 a chladič s emisivitou 0,95 by vyžaroval takmer dvojnásobok ako ten s emisivitou 0,6. Z tohto pohľadu dáva využitie vysoko vodivých plastových materiálov ako plastových chladičov ešte väčší zmysel a to najmä v prípade, že je ich geometria prispôsobená vyžarovaniu tepla do okolia.

V tab. 7 a tab. 8 sú číselne zobrazené výsledky pre meranie teplôt ohrievacieho telesa pre chladič geometrie 1 s 6 mm širokými rebrami z vysoko tepelne vodivého a elektricky vodivého plastového materiálu s najväčšou efektivitou chladenia, s hliníkovými chladičmi geometrie 2 s 3 mm širokými chladičmi s nelešteným a lešteným povrchom pre teploty okolia 20 a 50 $^{\circ}\text{C}$. Je opäť vidieť výrazne vyššiu efektivitu chladenia u nelešteného hliníku vďaka jeho vyššej emisivite v porovnaní s lešteným náprotivkom. Plastový chladič dosahuje výrazne nižšej chladiacej efektivity, ale tento rozdiel nie je až taký výrazný v prípade teploty okolia 50 $^{\circ}\text{C}$. V prípade aplikácie, kde teplota okolia je výrazne vyššia od štandardnej izbovej teploty, nedosahujú plastové chladiče tak výrazne nižšej efektivity a to práve vďaka ich vysokej emisivite povrchu. Takouto aplikáciou sú napríklad automobilové svetlomety, ktoré sú vyhrievané motorovým priestorom.

Tab. 7 Porovnanie teplôt ohrievacieho telesa chladeného plastovým chladičom geometrie 1 s teplotami na hliníkových chladičoch geometrie 2 pri teplote okolia 20 °C

Výkon (W)	Teplota plast ϵ 0,95 (°C)	Teplota hliník ϵ 0,6 (°C)	Rozdiel (°C)	Teplota hliník ϵ 0,135 (°C)	Rozdiel (°C)
2,5	32,8	31,3	1,5	31,4	1,4
5	40,6	37,7	2,9	38,4	2,2
7,5	49,1	43,7	5,4	44,3	4,8
10	55,8	48,6	7,2	50,2	5,6
12,5	63,1	53,5	9,6	55,4	7,7
15	69,5	57,5	12,0	59,9	9,6

Tab. 8 Porovnanie teplôt ohrievacieho telesa chladeného plastovým chladičom geometrie 1 s teplotami na hliníkových chladičoch geometrie 2 pri teplote okolia 50 °C

Výkon (W)	Teplota plast ϵ 0,95 (°C)	Teplota hliník ϵ 0,6 (°C)	Rozdiel (°C)	Teplota hliník ϵ 0,135 (°C)	Rozdiel (°C)
2,5	62,0	62,1	-0,1	62,6	-0,6
5	70,8	68,0	2,8	69,6	1,2
7,5	78,2	73,5	4,7	75,9	2,3
10	85,5	78,9	6,6	82,4	3,1
12,5	93,2	84,0	9,2	86,8	6,4
15	98,4	88,7	9,7	91,9	6,5

7 Efektivita chladiča v uzavretom priestore

V predchádzajúcej kapitole bolo ukázané, že vysoko tepelne vodivé plastové pasívne chladiče môžu za istých podmienok mať svoju chladiacu efektivitu výrazne bližšiu k efektívite hliníkových chladičov (vysoká teplota okolia, nízka emisivita povrchu hliníkového chladiča...). Aplikácie ako automobilové svetlomety, majú okrem teploty vyššej ako izbová teplota ešte jednu veľmi špecifickú charakteristiku, a to stiesnený uzavretý priestor. V takomto priestore je odvod tepla konvekciou silno potlačený, zatiaľ čo odvod tepla radiáciou rastie následným vyšším ohrievaním chladiča.

Pre porovnanie chladiacej efektivity v takýchto zhoršených podmienkach boli do meracieho boxu vložené dva oceľové plechy, totožné so stenami boxu, po hranách opatrené tesnením a skrutkami slúžiacimi k úchytu chladiča pritiahnuté k držiakom po stranách boxu. Tieto plechy boli na svojich vnútorných povrchoch taktiež nastriekané grafitovým sprejom, za cieľom dosiahnutia známej emisivity celého okolia.

Na obr. 23 je ukázaný plastový chladič (vľavo) a hliníkový chladič (vpravo) v takto upravenom meracom boxe. Uprostred spodného plechu bola vyvŕtaná diera pre napájanie ohrievacieho telesa a pre vedenie termočlánku na ňom uloženom. Touto dierou bol taktiež do vymedzeného priestoru vložený odporový teplomer PT100 za účelom merania teploty vzduchu vo vnútri.



Obr. 23 Chladiče uložené v meracom boxe s obmedzeným priestorom

Tento priestor bol široký a hlboký ako základný box, jeho výška ale bola vymedzená na 90 mm, teda celkový objem uzavretého priestoru bol $3,6 \text{ dm}^3$.

Bol opäť porovnávaný plastový chladič geometrie 1 s 6 mm širokými rebrami s hliníkovými chladičmi geometrie 2 s 3 mm širokými rebrami. Chladiaca efektivita chladičov bola meraná s krokom elektrického príkonu 2,5 W pre teploty okolia 20 a 50 °C.

Za izbovej teploty dosahoval plastový chladič v porovnaní s hliníkovými chladičmi menšieho rozdielu chladiacej efektivity v uzavretom priestore než ako tomu bolo za ideálnych podmienok. Presné hodnoty pre meranie s teplotou okolia 20 °C sú vyčíslené v tab. 9.

Tab. 9 Porovnanie teplôt ohrievacieho telesa chladeného plastovým chladičom geometrie 1 s teplotami na hliníkových chladičoch geometrie 2 v uzavretom priestore pri teplote okolia 20 °C

Výkon (W)	Teplota plast ϵ 0,95 (°C)	Teplota hliník ϵ 0,6 (°C)	Rozdiel (°C)	Teplota hliník ϵ 0,135 (°C)	Rozdiel (°C)
2,5	33,4	32,3	-1,1	33,5	0,1
5	43,6	41,0	-2,6	43,2	-0,4
7,5	52,8	48,1	-4,7	50,6	-2,2
10	61,1	55,5	-5,6	57,9	-3,2
12,5	70,5	62,0	-8,5	65,8	-4,7
15	77,6	69,2	-8,4	73,1	-4,5
17,5	85,9	75,3	-10,6	78,9	-7,0
20	92,2	81,3	-10,9	86,4	-5,8

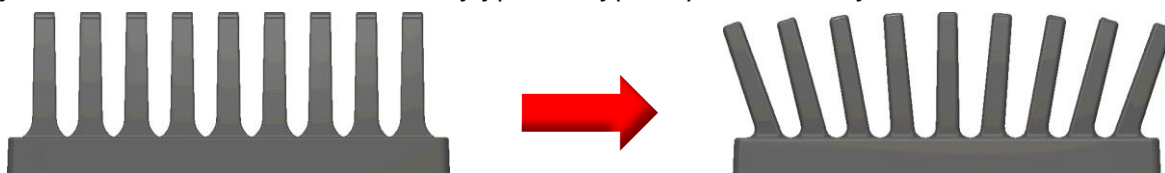
V prípade teploty okolia 50 °C dosahoval plastový chladič takmer totožnej chladiacej efektivity ako chladič z hliníku s nízkou emisivitou povrchu. V tab. 10 sú zobrazené číselné hodnoty a rozdiely teplôt v prípade hliníkových chladičov s chladičom plastovým pre teplotu okolia 50 °C.

Tab. 10 Porovnanie teplôt ohrievacieho telesa chladeného plastovým chladičom geometrie 1 s teplotami na hliníkových chladičoch geometrie 2 v uzavretom priestore pri teplote okolia 50 °C

Výkon (W)	Teplota plast ϵ 0,95 (°C)	Teplota hliník ϵ 0,6 (°C)	Rozdiel (°C)	Teplota hliník ϵ 0,135 (°C)	Rozdiel (°C)
2,5	62,9	63,9	1,0	61,9	-1,0
5	72,7	73,0	0,3	70,4	-2,3
7,5	81,5	80,9	-0,6	78,4	-3,1
10	89,6	89,4	-0,2	85,4	-4,2
12,5	97,1	95,7	-1,4	90,9	-6,2
15	101,9	100,2	-1,7	96,9	-5,0

8 Návrh plastového chladiča s ohľadom na prenos tepla radiáciou a jeho hmotnosť

Vzájomne rovnobežne uložené rebra nie sú z pohľadu odvodu tepla radiáciou vhodné, pretože väčšinu ich tepla vyžarujú jedno na druhé. Pôvodná geometria s 6 mm rebrami bola teda mierne upravená a bol urobený návrh, kde vzhľadom na prostredné rebro bolo každé ďalšie vzdialenejšie rebro naklonené o 5°, teda krajné rebra dosahovali náklon 20° od svojej pôvodnej polohy. Táto zmena je zobrazená na obr. 24.



Obr. 24 Zmena geometrie 1 s postupným náklonom rebier o 5°

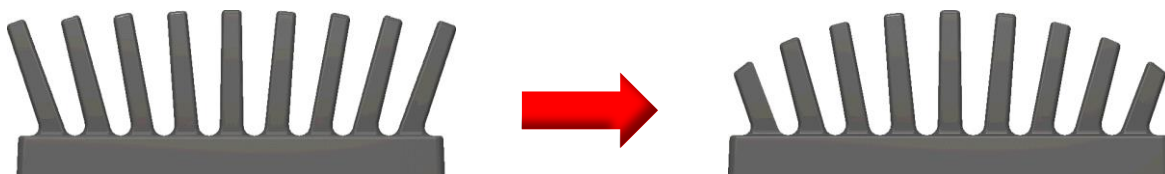
V tab. 11 je porovnanie teplôt zdroja tepla medzi pôvodnou a upravenou geometriou pre teploty okolia 20 a 50 °C pri tepelnom toku 15W. Získané výsledky boli dosiahnuté navrhnutou numerickou simuláciou.

Tab. 11 Porovnanie výsledkov simulácie pre pôvodnú geometriu chladiča a pre geometriu s naklonenými rebrami pre teploty okolia 20 a 50 °C

Teplota okolia (°C)	Teplota zdroja tepla – pôvodná geometria (°C)	Teplota zdroja tepla – upravená geometria (°C)	Rozdiel (°C)
20	70,8	68,4	2,4
50	100,1	96,9	3,2

Simulácia ukazuje teda vyššiu chladiacu efektivitu pre takto upravenú geometriu a taktiež výraznejšie zlepšenie pre vyššiu teplotu okolia. Ďalšia zmena, ktorá nastala pri takomto náklone rebier bolo zmenšenie hmotnosti, kde z pôvodných 223 g klesla hmotnosť na 216 g.

Z pohľadu ďalšej redukcie hmotnosti je možné skrátiť rebra s ich narastajúcou vzdialenosťou od rebra uprostred. Príklad takejto zmeny je ukázaný na obr. 25.



Obr. 25 Skrátenie rebier v závislosti na vzdialenosti od stredu základne

Novo vzniknutá geometria bola opäť podrobená numerickej simulácii a porovnanie výsledkov je v tab. 12.

Tab. 12 Porovnanie výsledkov simulácie pre geometriu chladiča s naklonenými rebrami a pre geometriu s naklonenými a postupne skrátenými rebrami pre teploty okolia 20 a 50 °C

Teplota okolia (°C)	Teplota zdroja tepla – naklonené rebra(°C)	Teplota zdroja tepla – skrátené rebra(°C)	Rozdiel (°C)
20	68,4	69,8	1,4
50	96,9	98,5	1,6

Je tu vidieť pokles chladiacej efektivity, ktorá je ale aj napriek tomu stále lepšia ako v prípade rovnobežných rebier. Avšak, pri takejto zmene došlo k poklesu hmotnosti z 216 g na len 201 g.

Záver

Táto práca rozoberá možnosť a problematiku využitia vysoko tepelne vodivých nekovových (konkrétne plastových) materiálov ako náhradu typicky používaných kovov ako pasívnych chladičov.

Je tu nahliadnuté na problematiku vysoko tepelne vodivých plastov a to konkrétne na ich neizotropnú tepelnú vodivosť. Tá je spôsobená geometriou použitého plniva a jeho orientáciou v telese, ktorá podlieha smeru toku taveniny pri výrobe chladiča.

Pre účely tejto práce boli vyrobené dve geometrie chladičov, ktoré sa v zásade líšili iba v hrúbke rebier a následnému počtu medzi nimi (z technologických dôvodov bola rozdielna aj hrúbka základne, ktorá bola zvolená tak, aby nedochádzalo k jej prepadu). Tenšie rebrá mali hrúbku 3 mm, čo sa ukázalo pre skúmané materiály ako technologický limit a hrubšie rebrá mali hrúbku dvojnásobnú, teda 6 mm. Obe geometrie boli vyrobené tromi odlišnými spôsobmi, ktoré sa medzi sebou odlišovali vtokom taveniny do tela samotného chladiča. Jednalo sa konkrétne o tok do dlhšej strany základne chladiča (rovnobežne s rebrami), do kratšej strany základne (kolmo k rebrám) chladiča a do jej stredu.

Práca skúma dva plastové materiály, ktoré sú obohatené o tepelne vysoko vodivé plnivo a ich rozdiel je v ich schopnosti okrem tepla viesť aj elektrinu. Elektricky nevodivý materiál so síce výraznou tepelnou vodivosťou v porovnaní s klasickými plastmi sa však nejaví ako dobrá náhrada, použité plnivo ho robí podobne ťažkým ako klasické hliníkové chladiče a efektívnosť chladenia je výrazne nižšia.

Tepelne vysoko vodivý a taktiež elektrický vodivý materiál, ktorý pre svoju tepelnú vodivosť využíva plnivo vo forme grafitových vločiek sa javí ako možná náhrada klasických chladičov. Jeho hmotnosť je v porovnaní s hliníkovými zliatinami zhruba polovičná a aj keď je jeho chladiaca efektívnosť taktiež nižšia, dosahuje v rámci ušetrenej hmotnosti dobrých výsledkov.

Všetky merané varianty boli premerané v dvoch pozíciách, klasickej a „hore-nohami. Ukázalo sa totiž, že v prípade vstupu taveniny do dlhšej strany základne sa jej tok na konci rebier stočí a teda je v tomto mieste inak orientované vysoko tepelne vodivé plnivo. Tým pádom sa studený nasávajúci vzduch zo spodnej časti chladiča dostane do tejto oblasti v jednom prípade skôr a v druhom prípade neskôr až pri opúšťaní chladiča. Toto spôsobuje výrazne rozdielne teplotné gradienty a takto vyrobený chladič dosahuje výrazne lepšej chladiacej efektivity iba správnym umiestnením. V prípade merania v jednej polohe bola teplota zdroja tepla 72,3 °C a v druhej polohe 69,5 °C, rozdiel bol teda 2,8 °C pri zachovaní rovnakých podmienok (teplota okolia, výkon ohrievacieho telesa).

Z tejto časti vznikla ďalej popísaná jednoduchá a rýchla metodika navrhnutia pasívneho chladiča s ohľadom na jeho neizotropnú tepelnú vodivosť. Tento postup sa skladá sčasti z analytického výpočtu, kde sa odhadne teplota zdroja tepla a dopočíta sa súčiniteľ prestupu tepla, ktorý sa následne aplikuje do numerickej simulácie, kde je tepelná vodivosť materiálu určená z prepočtu jednotlivých tepelných odporov.

Ďalej je uvedený často zanedbávaný význam odvodu tepla radiáciou u pasívnych chladičov a jeho veľký význam práve u plastových chladičov, vďaka ich vysokej emisivite.

Na záver berie práca predchádzajúce zistenia do úvahy (vhodná geometria, vplyv emisivity na chladenie...) a aplikuje ich na vylepšenie stávajúcej geometrie, kde sa ukázalo, že s náklonom rebier od ich spoločnej rovnobežnosti sa dá dosiahnuť ešte lepšej chladiacej efektivity.

Pasívne chladiče vyrobené z nekonvenčných materiálov, v tomto prípade z vysoko tepelne vodivých plastov, sa teda javia ako možná alternatíva klasickým materiálom, avšak je potrebné ich aplikovať do správnych podmienok (stiesnený priestor, vysoká teplota okolia) a ich geometria musí byť taktiež prispôbená ich vlastnostiam (neizotropná tepelná vodivosť, vysoká emisivita).

Literatúra

- [1] Thermally conductive plastics in LED lamps. DSM [online]. 2010 [cit. 2017-02-28]. Dostupné z: https://www.dsm.com/content/dam/dsm/automotive/zh_CN/documents/stanyl-tc-technical-details.pdf
- [2] GRUNDLER, M., T. DEREITH a A. HEINZEL. Polymer Compounds with High Thermal Conductivity. In: PROCEEDINGS OF THE REGIONAL CONFERENCE GRAZ 2015 - POLYMER PROCESSING SOCIETY PPS: CONFERENCE PAPERS. 2015, s. 5. DOI: 10.1063/1.4965485. ISBN 978-0-7354-1441-9. ISSN 0094-243X.
- [3] STEWART, Richard. Thermally Conductive Polymers. Plastics Engineering. Brookfield Center, 2004, (1), 20. ISSN 00919578.
- [4] Plastics That Conduct Heat. PLASTICS TECHNOLOGY [online]. 2001 [cit. 2017-03-21]. Dostupné z: <http://www.ptonline.com/articles/plastics-that-conduct-heat>
- [5] Heat Transfer. CELANESE: The chemistry inside innovation [online]. 2017 [cit. 2017-03-21]. Dostupné z: <http://www.coolpolymers.com/heattrans.html>
- [6] HEINLE, C. a D. DRUMMER. Potential of thermally conductive polymers for the cooling of mechatronic parts. Physics Procedia. 2010, 3(5), 735-744. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.phpro.2010.08.106>. ISSN 1875-3892.
- [7] CELANESE: The chemistry inside innovation [online]. 2017 [cit. 2017-03-21]. Dostupné z: <http://www.coolpolymers.com>
- [8] LEE, Ho. Thermal design: heat sinks, thermoelectrics, heat pipes, compact heat exchangers, and solar cells. Hoboken, NJ: Wiley, 2010. ISBN 978-0-470-49662-6.
- [9] Fluid Properties Calculator. University of Waterloo [online]. b.r. [cit. 2016-02-29]. Dostupné z: <http://www.mhtl.uwaterloo.ca/old/online-tools/airprop/airprop.html>
- [10] INCROPERA, Frank a David DEWITT. Fundamentals of heat and mass transfer. 6th ed. / Hoboken, NJ: John Wiley, 2007, xxv, 997 p. ISBN 978-047-1457-282.
- [11] OSOLON® Compact PL, KW2 CFLNM1.TG. OSRAM: Opto Semiconductors [online]. Regensburg, Germany, 2020 [cit. 2020-04-06]. Dostupné z: [https://www.osram.com/ecat/OSOLON®%20Compact%20PL%20KW2%20CFLNM1.TG/com/en/class_pim_web_catalog_103489/global/prd_pim_device_2190864/](https://www.osram.com/ecat/OSOLON%20Compact%20PL%20KW2%20CFLNM1.TG/com/en/class_pim_web_catalog_103489/global/prd_pim_device_2190864/)

Životopis autora

Osobné údaje

Dátum narodenia: 9.10.1992
Miesto narodenia: Trenčín, SR
Trvalé bydlisko: Hodžova 31, 911 01, Trenčín, SR
Telefón: (+420) 773 531 122
E-mail: martin.zachar@vutbr.cz
Rodinný stav: Slobodný

Vzdelanie

2016 – doteraz VUT v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Obor Inženýrská mechanika
2014 – 2016 VUT v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Obor Energetické inženýrství
2011 – 2014 VUT v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Obor Strojní inženýrství
2003 – 2011 8-ročné Francúzsko-Slovenské bilingválne gymnázium Ľudovíta Štúra v Trenčíne

Zamestnanie

09/2016 – doteraz VUT v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Laboratoř přenosu tepla a proudění, technik
07/2014 – 09/2014 Slovenská pošta, poštár
09/2011 – 08/2013 Relax centrum, recepčný

Ďalšie schopnosti a znalosti

Jazykové znalosti: Angličtina C2 (Certificate in Advanced English – C2)
Španielčina B1
Francúzština A2 (Odborná štátnica z francúzskeho jazyka C1, Diplôme de maturita bilingue franco-slovaque, Diplôme d'études en langue française DELF B1)
Taliančina A2

Vodičské oprávnenie: AM, B

PC znalosti: Microsoft Office, Matlab, ANSYS, Autodesk Inventor

Abstrakt

Táto práca pojednáva o možnosti využitia nekovových vysoko tepelne vodivých materiálov, a to konkrétne špeciálnych plastových materiálov, obohatených vysoko tepelne vodivou prísadou, za účelom pasívneho chladenia daného zdroja tepla. Práca porovnáva efektívnosť takýchto chladičov s klasicky využívanými materiálmi, konkrétne hliníkom.

Práca je rozdelená na dve hlavné sekcie, teoretickú a praktickú. Teoretická časť pojednáva o čoraz častejšej problematike chladenia LED (Light emitting diode – Svetlo emitujúca dióda) čipov v automobilovej osvetľovacej technike, kde by sa nové materiály mohli uplatniť, rozoberá možnú náhradu klasických hliníkových chladičov inými materiálmi s výrazne nižšou tepelnou vodivosťou a uvádza problematiku takýchto materiálov.

Praktická časť aplikuje problematiku popísanú v časti teoretickej na reálne vyrobené chladiče, ktoré sú porovnávané ako medzi sebou, s ohľadom na ich spôsob výroby, tak aj s hliníkovým náprotivkom za rôznych podmienok. Následne je rozoberaná problematika návrhu chladiča z materiálu, ktorý sa vyznačuje výrazne neizotropnou tepelnou vodivosťou.

Záver práce poukazuje na dôležitosť odvodu tepla radiáciou, ktorá môže mať práve v prípade plastových chladičov a za konkrétneho použitia veľký význam.

Abstract

This thesis deals with the use of non-metallic highly thermally conductive materials, more concretely special plastic materials, enriched with highly thermally conductive additives, for the purpose of passive cooling of a given heat source. The thesis compares the effectivity of these heat sinks with the classically used materials, specifically aluminium.

The thesis is divided into two main sections, theoretical and practical. The theoretical part deals with a constantly growing need of LED (Light Emitting Diode) chips cooling in automotive headlamps, where the new materials could be put into effect, analyses possible replacement of classic aluminium heat sinks with different materials with a significantly lower thermal conductivity and introduces problems of such materials.

The practical part applies the problematic described in the theoretical one on the actually produced heat sinks, which are compared among themselves, with regard to their method of production, as well as with aluminium counterpart in different conditions. Furthermore, the problematic of designing a heat sink made from material which is characteristic for its highly anisotropic thermal conductivity is dealt with.

The end of the thesis shows the importance of heat dissipation via radiation, which can have a great significance in case of plastic heat sinks and in a specific applications.