

Tepelně vodivé termoplastické materiály

Jana Zemanová

Bakalářská práce
2016

 Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav inženýrství polymerů

akademický rok: 2015/2016

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Jana Zemanová**
Osobní číslo: **T13654**
Studijní program: **B2808 Chemie a technologie materiálů**
Studijní obor: **Polymerní materiály a technologie**
Forma studia: **kombinovaná**

Téma práce: **Tepelně vodivé termoplastické materiály**

Zásady pro vypracování:

Student vypracuje literární rešerši na dané téma. Tato bude obsahovat vysvětlení základních pojmů týkajících se tepelné vodivosti a uvedení příkladů a porovnání tepelné vodivosti vybraných materiálů. Dále se student zaměří na zpracovatelské technologie od přípravy tepelně vodivých termoplastických materiálů až po jejich zpracování na finální výrobek. V závěru práce student porovná vlastnosti výrobků z uvažovaných kompozitů a klasických kovových materiálů.



Rozsah bakalářské práce:

Rozsah příloh:

Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

Thermal conductivity of MWCNT/epoxy composites: The effects of length, alignment and functionalization - J.G Park

Effective thermal conductivity of composites, International Journal of Heat and Mass Transfer - F. Gori, S. Corasaniti

Thermal conductivity of polymer composites with oriented boron nitride, Thermochemica Acta - Hong Jun Ahn, Young Jun Eoh, Sung Dae Park, Eung Soo Kim

Thermal conductivity and heat transfer performance enhancement of phase change materials (PCM) containing carbon additives for heat storage application, International Journal of Refrigeration - Da Hee Choi, Juhuk Lee, Hiki Hong, Yong Tae Kang

Estimation of thermal conductivities of a novel fuzzy fiber reinforced composite, International Journal of Thermal Sciences - S.I. Kundalwal, M.C. Ray

Thermal conductivity of polypropylene-based composites with multiwall carbon nanotubes with different diameter and morphology, Journal of Alloys and Compounds - I.N. Mazov, I.A. Ilinykh, V.L. Kuznetsov, A.A. Stepashkin, K.S. Ergin, D.S. Muratov, V.V. Tcherdyntsev, D.V. Kuznetsov, J.-P. Issi

Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Martina Polášková, Ph.D.

Ústav inženýrství polymerů

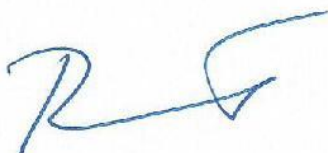
Datum zadání bakalářské práce:

15. ledna 2016

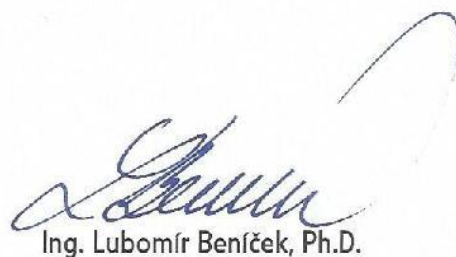
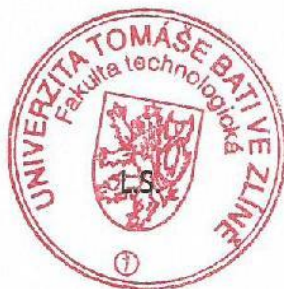
Termín odevzdání bakalářské práce:

20. května 2016

Ve Zlíně dne 1. března 2016



doc. Ing. František Buňka, Ph.D.
děkan



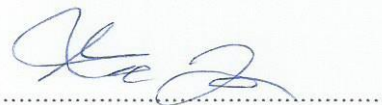
Ing. Lubomír Beníček, Ph.D.
ředitel ústavu

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že

- beru na vědomí, že odevzdáním diplomové/bakalářské práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, bez ohledu na výsledek obhajoby ¹⁾;
- beru na vědomí, že diplomová/bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému dostupná k nahlédnutí, že jeden výtisk diplomové/bakalářské práce bude uložen na příslušném ústavu Fakulty technologické UTB ve Zlíně a jeden výtisk bude uložen u vedoucího práce;
- byl/a jsem seznámen/a s tím, že na moji diplomovou/bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3 ²⁾;
- beru na vědomí, že podle § 60 ³⁾ odst. 1 autorského zákona má UTB ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- beru na vědomí, že podle § 60 ³⁾ odst. 2 a 3 mohu užít své dílo – diplomovou/bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- beru na vědomí, že pokud bylo k vypracování diplomové/bakalářské práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tedy pouze k nekomerčnímu využití), nelze výsledky diplomové/bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- beru na vědomí, že pokud je výstupem diplomové/bakalářské práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Ve Zlíně 25. 05. 2016



¹⁾ zákon č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, § 47 Zveřejňování závěrečných prací:

(1) Vysoká škola nevdělečně zveřejňuje disertační, diplomové, bakalářské a rigorózní práce, u kterých proběhla obhajoba, včetně posudků oponentů a výsledku obhajoby prostřednictvím databáze kvalifikačních prací, kterou spravuje. Způsob zveřejnění stanoví vnitřní předpis vysoké školy.

(2) Disertační, diplomové, bakalářské a rigorózní práce odevzdané uchazečem k obhajobě musí být též nejméně pět pracovních dnů před konáním obhajoby zveřejněny k nahlížení veřejnosti v místě určeném vnitřním předpisem vysoké školy nebo není-li tak určeno, v místě pracoviště vysoké školy, kde se má konat obhajoba práce. Každý si může ze zveřejněné práce pořizovat na své náklady výpisy, opisy nebo rozmnoženiny.

(3) Platí, že odevzdáním práce autor souhlasí se zveřejněním své práce podle tohoto zákona, bez ohledu na výsledek obhajoby.

²⁾ zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, § 35 odst. 3:

(3) Do práva autorského také nezasahuje škola nebo školské či vzdělávací zařízení, užije-li nikoli za účelem přímého nebo nepřímého hospodářského nebo obchodního prospěchu k výuce nebo k vlastní potřebě dílo vytvořené žákem nebo studentem ke splnění školních nebo studijních povinností vyplývajících z jeho právního vztahu ke škole nebo školskému či vzdělávacímu zařízení (školní dílo).

³⁾ zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, § 60 Školní dílo:

(1) Škola nebo školské či vzdělávací zařízení mají za obvyklých podmínek právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla (§ 35 odst. 3). Odírá-li autor takového díla udělit svolení bez vážného důvodu, mohou se tyto osoby domáhat nahrazení chybějícího projevu jeho vůle u soudu. Ustanovení § 35 odst. 3 zůstává nedotčeno.

(2) Není-li sjednáno jinak, může autor školního díla své dílo užít či poskytnout jinému licenci, není-li to v rozporu s oprávněnými zájmy školy nebo školského či vzdělávacího zařízení.

(3) Škola nebo školské či vzdělávací zařízení jsou oprávněny požadovat, aby jim autor školního díla z výdělku jím dosaženého v souvislosti s užitím díla či poskytnutím licence podle odstavce 2 přiměřeně přispěl na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložily, a to podle okolností až do jejich skutečné výše; přitom se přihlídáne k výši výdělku dosaženého školou nebo školským či vzdělávacím zařízením z užití školního díla podle odstavce 1.

ABSTRAKT

Předmětem této bakalářské práce je studium tepelné vodivosti termoplastických kompozitních materiálů, jejich příprava a zpracování. Jsou zde popsány mechanismy sdílení tepla i metody měření tepelné vodivosti. Dále je pozornost soustředěna na materiály, které slouží jako vhodná plniva za účelem zvýšení tepelné vodivosti kompozitu. Poslední část práce je zaměřena na použití tepelně vodivých termoplastických materiálů jako náhrady kovů ve speciálních aplikacích.

Klíčová slova: Sdílení tepla, tepelná vodivost, termoplasty, kompozity.

ABSTRACT

The subject of this thesis is to study the thermal conductivity of thermoplastic composite materials, their preparation and processing. There are described heat transfer mechanisms and methods for measuring thermal conductivity. Furthermore, attention is focused on the materials, which serve as a suitable filler to increase the thermal conductivity of the composite. The last part is focused on the use of thermally conductive thermoplastic materials to replace metals in special applications.

Keywords: Heat transmission, thermal conductivity, thermoplastics, composites.

Poděkování:

Tímto bych chtěla poděkovat především vedoucí práce Ing. Martině Poláškové, Ph.D. za odborné vedení, poskytnuté rady a trpělivost v průběhu zpracování bakalářské práce. Dále děkuji své rodině a všem ostatním za jejich shovívavost.

Prohlašuji, že odevzdaná verze bakalářské práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou totožné.

OBSAH

ÚVOD	9
I TEORETICKÁ ČÁST	10
1 SDÍLENÍ TEPLA	11
1.1 SDÍLENÍ TEPLA VEDENÍM	11
1.1.1 Tepelná vodivost	11
1.1.1.1 Měření tepelné vodivosti	12
1.1.1.2 Vliv struktury pevných látek na tepelnou vodivost.....	12
1.1.2 Teplotní vodivost	14
1.2 SDÍLENÍ TEPLA PROUDĚNÍM	14
1.2.1 Rovnováha mezi vedením a prouděním	15
1.3 SDÍLENÍ TEPLA ZÁŘENÍM.....	17
2 KOMPOZITY	18
2.1 POLYMERNÍ MATRICE	19
2.1.1 Termoplastické materiály	19
2.2 TEPELNĚ VODIVÁ PLNIVA	20
2.2.1 Částicová plniva	22
2.2.2 Vláknová plniva	23
2.2.3 Efektivní tepelná vodivost kompozitů	24
2.2.4 Uhlíková plniva	24
2.2.4.1 Uhlíková a grafitová vlákna.....	25
2.2.4.2 Nanodiamanty	26
2.2.4.3 Grafit	26
2.2.4.4 Grafen	27
2.2.4.5 Uhlíkové nanotrubičky.....	28
2.2.5 Kovová plniva	29
2.2.6 Keramická plniva	29
3 ZPRACOVATELSKÉ TECHNOLOGIE	31
3.1 PŘÍPRAVA KOMPOZITNÍCH SMĚSÍ	31
3.1.1 Mísení plniva s taveninou	31
3.1.2 Granulace polymerních směsí	31
3.2 VSTŘIKOVÁNÍ.....	32
3.3 POLYMERACE IN SITU	34
4 APLIKACE TEPELNĚ VODIVÝCH TERMOPLASTŮ	35
ZÁVĚR	37
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	38
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	42
SEZNAM OBRÁZKŮ	44
SEZNAM TABULEK	45

ÚVOD

Přestože jsou samotné termoplasty označovány jako tepelně izolační materiály, termoplasty plněné tepelně vodivými plnivými se díky jejich nezastupitelným výhodám řadí mezi významné materiály, které jsou na dnešním trhu použitelné v řadě speciálních aplikací.

V posledních desetiletích roste zájem o kompozitní materiály v celosvětovém měřítku. Tento nárůst je způsoben hlavně lepšími mechanickými vlastnostmi některých kompozitů a snížením hmotnosti oproti kovovým materiálům. Tyto pevné, tuhé a houževnaté kompozity mohou nalézt využití v mnoha průmyslových odvětvích. Kompozit je materiál složený z odlišných materiálových složek, který získá ve výsledku vlastnosti, jež se nedají získat žádným z jednotlivých materiálů.

Termoplasty sloužící jako matrice mají ve srovnání s reaktoplasty řadu výhod. Patří mezi ně snadnější výroba, možnost složitých tvarů a v neposlední řadě nižší cena. Jako plniva slouží materiály s vysokou tepelnou vodivostí, mezi které se nejčastěji řadí kovové a keramické materiály a materiály na bázi uhlíku, kterým je v kapitole o tepelně vodivých plnivech věnována největší pozornost. Je to hlavně díky tomu, že je jejich tepelná vodivost oproti ostatním materiálům znatelně vyšší.

Hlavní úlohou tepelně vodivých termoplastů je účinný odvod tepla u výkonných zařízení malých rozměrů, který vede ke snížení přehřívání součástek a zvýšení jejich životnosti. Kromě specifických tepelných vlastností jsou jejich výhodou také elektrické a dielektrické vlastnosti, nízká hustota, odolnost vůči korozi a chemikáliím a možnost vyrobít kompozit, který splňuje požadavky dané aplikace. Uplatnění tepelně vodivých termoplastů lze nalézt na trhu s osvětlením a elektronikou.

Hlavním cílem této bakalářské práce bylo vypracování literární rešerše na dané téma s názvem tepelně vodivé termoplastické materiály.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 SDÍLENÍ TEPLA

Sdílení tepla je přenos energie způsobený rozdílem teplot v médiu nebo mezi médii, tento přenos energie probíhá z oblasti s vyšší teplotou do té s nižší teplotou. Obecně platí zákon o zachování energie, který udává, že energie nemůže vzniknout z ničeho nebo zaniknout bez toho, aniž by se přeměnila v jinou. Existují tři základní mechanismy přenosu tepla:

- Sdílení tepla vedením (kondukcí)
- Sdílení tepla prouděním (konvekcí)
- Sdílení tepla zářením (radiací). [1, 2]

1.1 Sdílení tepla vedením

Vedení tepla je v podstatě přenos kinetické energie mezi molekulami a elektrony vlivem teplotních rozdílů. Když má jedna část tělesa vyšší teplotu než zbytek, přenos energie probíhá od teplejší oblasti k té s nižší teplotou. Vyšší teploty jsou spojeny s vyšší molekulární energií, a když dojde ke srážkám sousedních molekul, musí také dojít k přenosu energie z částice s vyšší energií do částice s nižší energií. Tento přenos značně závisí na vlastnostech prostředí, v němž se teplo vede, tj. na vlastnostech molekul a elektronů a jejich vzdálenosti. [1, 3]

1.1.1 Tepelná vodivost

Součinitel tepelné vodivosti λ [$Wm^{-1}K^{-1}$] je fyzikální vlastnost, která vyjadřuje schopnost materiálu sdílet energii vedením. Hodnota λ je charakteristická pro každý materiál a její hodnota udává, jak rychle bude teplo proudit v daném materiálu. Čím rychleji se molekuly pohybují, tím rychlejší bude přenos energie. [1, 4]

Zákon, který definuje tepelnou vodivost, se nazývá **Fourierův zákon vedení tepla** a jeho základní tvar je dán rovnicí:

$$q = -\lambda \nabla T \quad (1)$$

Kde q je vektor hustoty tepelného toku [Wm^{-2}],

λ – součinitel tepelné vodivosti [$Wm^{-1}K^{-1}$],

∇T – gradient teploty (teplotní spád) [Km^{-1}]. [5, 6]

Hustota tepelného toku q [Wm^{-2}] je množství tepla přeneseného přes izotermický povrch za čas a je vztažena na jednotku izotermické plochy A . Základní rovnice vypadá takto:

$$q = \frac{\lambda}{A} \nabla T \quad (2)$$

Z rovnice (2) tedy vyplývá, že hustota tepelného toku se zvyšuje s rozdílem teplot a součinitelem tepelné vodivosti a zmenšuje s tloušťkou stěny. [6]

1.1.1.1 Měření tepelné vodivosti

Pro měření tepelné vodivosti se využívá buď **stacionární metoda** (při ustáleném stavu) nebo **nestacionární metoda** (při neustáleném stavu). Základní princip těchto metod je stejný, a to že teplo přechází od povrchu vyhřívané desky, válce nebo koule izolační vrstvou k chladnějšímu povrchu. Během měření se zjišťuje tloušťka vzorku, obě povrchové teploty a množství odvedeného tepla nejčastěji převodem elektrické energie spotřebované ve vyhřívacím zařízení. [7]

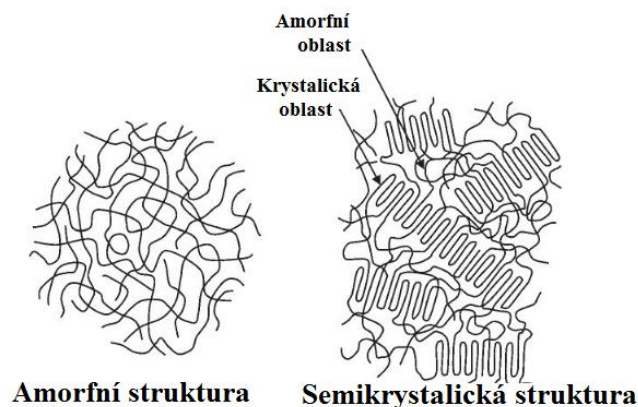
Nevýhodou stacionární metody je délka měření a složitý postup. Tyto nedostatky odstraňuje nestacionární měření tepla. [8] Nestacionární vedení tepla se liší od stacionárního tím, že se mění teplota v jednotlivých místech vzorku s časem. V praxi se tato metoda používá při ohřevu nebo chlazení při výrobě různých výrobků nebo při ohřevu a chlazení přístrojů a zařízení. Z nestacionárních metod se nejvíce využívá metoda podle Fitcha, při které teplo proudí z ohřívací nádoby přes zkušební materiál do měrného válce a sleduje se rozdíl teplot pomocí vhodného přístroje (milivoltmetr, galvanometr) za stanovený čas. [5, 7]

1.1.1.2 Vliv struktury pevných látek na tepelnou vodivost

Tepelná vodivost v pevných látkách je způsobena dvěma vlivy: přepravou volných elektronů a mřížkovými vibracemi (fonony). Obvykle jsou kovy lepší vodiče, protože zde dochází k obojímu, zatímco v nekověch způsobují tepelnou vodivost pouze fonony. Na tepelnou vodivost má také velký vliv pravidelnost uspořádání mřížky. Krystalické materiály mají vyšší tepelnou vodivost než amorfni materiály. Tepelná vodivost není konstantní pro stejnou látku, ale závisí na teplotě. Uvažujeme-li však omezený rozsah teplot, lze tuto změnu zanedbat. [1].

V rovnici (1) je předpokládán homogenní a izotropní materiál. To znamená, že když je v určitém bodě vyhříván, teplo se šíří ven ve všech směrech stejně dobře. Mezi tyto látky patří například amorfny polymery a kapaliny. Anizotropní látky (dřevo a jiné vláknité materiály) jsou směrově závislé a v podélném směru k ose orientace lze naměřit výrazně vyšší tepelnou vodivost než ve směru příčném.

Polymery mohou být amorfny nebo částečně krystalické. Jak je vidět na obrázku 1, amorfny strukturu tvoří náhodně zapletené řetězce, zatímco semikrystalická struktura obsahuje mimo to i krystalickou oblast a prostor mezi ní vyplňuje struktura amorfny. Při běžné teplotě je tepelná vodivost krystalické fáze semikrystalického plastu zhruba šestkrát vyšší než tepelná vodivost amorfny fáze. Kolem teploty tání semikrystalických polymerů nastane pokles tepelné vodivosti, protože při této teplotě dochází k rozpadu a tání krystalitů.



Obr 1 Srovnání amorfny a semikrystalické struktury polymerů. [9]

V tabulce 1 je znázorněno, že kovy mají obvykle až stokrát vyšší tepelnou vodivost než polymery, proto jsou polymery běžně označovány jako tepelné izolanty. [10, 11, 12]

Materiál	Součinitel tepelné vodivosti $\lambda [Wm^{-1}K^{-1}]$
PP	0,19
PE LD	0,33
PE HD	0,50

PA 6	0,25
PVC	0,19
PEEK	0,24
PPS	0,26
PTFE	0,25
Epoxidová pryskyřice	0,17
Sklo	1,00
Křemen	3,00
Nerezová ocel	16,40
Uhlíková ocel	50,00
Slitiny hliníku	90,00
Hliník	216,00
Měď	398,00
Stříbro	415,00
Diamant	2300,00

Tab. 1 Příklady tepelné vodivosti materiálů. [10]

1.1.2 Teplotní vodivost

K popisu sdílení tepla se kromě tepelné vodivosti používá i vodivost teplotní. Pokud je tepelná vodivost konstantní, součinitel teplotní vodivosti se dá získat diferenciální bilancí entalpie Fourierova zákona. Výsledná rovnice se nazývá Fourierova rovnice pro jednosměrné vedení tepla:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \nabla^2 T \quad (3)$$

Součinitel teplotní vodivosti a [$m^2 s^{-1}$] z rovnice (3) je veličina, která je definována pomocí tepelné vodivosti dané látky λ , její hustoty ρ a měrné tepelné kapacity při konstantním tlaku c_p :

$$a \equiv \frac{\lambda}{\rho \cdot c_p} \quad (4)$$

Hodnota teplotní vodivosti se buď vypočítá z rovnice (4) nebo se najde v příslušných tabulkách. [3]

1.2 Sdílení tepla prouděním

Proudění je proces, kterým se tepelná energie přenáší mezi pevnou látkou a tekutinou proudící kolem ní. Konvekce není samostatný proces přenosu tepla. K proudění tekutiny

dochází na základě konvekce a přenos mezi pevnou látkou a tekutinou se děje s pomocí kondukce – jde o konvekčně-kondukční sdílení tepla. Je zřejmé, že se musí umožnit pohyb tekutého systému, ale nepodílí se na tom žádný nový základní mechanismus přenosu tepla. [1, 6] Rozlišujeme dva druhy konvekce tepla:

- **Nucená konvekce** – proudění je způsobeno rozdílem tlaků (např. použitím ventilátoru, čerpadla).
- **Volná konvekce** – proudění vznikne změnou hustoty látky při jejím zahřátí.

Při proudění kromě teplotních rozdílů, které udávají teplotní pole, existují ještě rychlostní pole, které má na svědomí usměrněný pohyb částic. Když pak dochází k přenosu hmoty, tyto dvě pole se navzájem ovlivňují. Dochází pak nejen k přenosu energie vedením, ale také pohybem částic. Proudění je proto účinnější přenos tepla než vedení. [2]

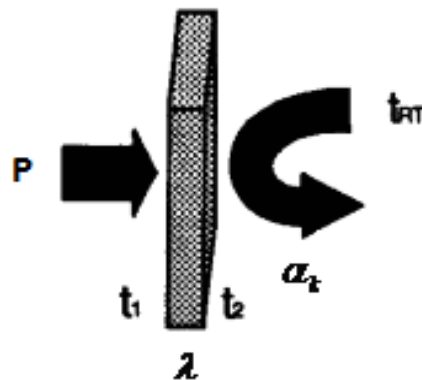
Součinitel přestupu tepla α_k [$Wm^{-2}K^{-1}$] je množství tepla předané za určitou dobu mezi tekutinou a povrchem stěny, je-li mezi povrchem a tekutinou rozdíl teplot 1 K. Jeho základní tvar je dán rovnicí:

$$q_k = -\alpha_k \nabla T \quad (5)$$

Součinitel stanovuje intenzitu výměny tepla na rozhraní tekutiny a povrchu stěny. Čím vyšší je jeho hodnota, tím intenzivněji k výměně tepla dochází. [6]

1.2.1 Rovnováha mezi vedením a prouděním

K pochopení a určení rovnováhy mezi kondukčními a konvekčními prvky byl vyvinut jednoduchý model, který pomůže objasnit požadavky na řízení tepla. Jedná se o kombinovaný přestup tepla. Tento model, jež je znázorněn na obrázku 2, je založen na ploché desce, kde je na jedné straně umístěn napájecí zdroj. Teplo se přenáší přes desku vedením (kondukcí) a odchází z vnějšího povrchu prouděním (konvekcí). Rozsah gradientu skrz desku je řízen tepelnou vodivostí materiálu λ .



Obr. 2 Model ploché desky pro kombinovaný přestup tepla. [13]

Vedení tepla:
$$t_1 - t_2 = \frac{P \cdot l}{A \cdot \lambda} \quad (6)$$

Proudění tepla:
$$t_2 - t_{AT} = \frac{P}{A \cdot \alpha_k} \quad (7)$$

Kde: λ = součinitel tepelné vodivosti [$Wm^{-1}K^{-1}$]

α_k = součinitel přestupu tepla [$Wm^{-2}K^{-1}$]

P = příkon [W]

A = plocha desky [m^2]

l = tloušťka desky [m]

V tomto případě je teplotní gradient mezi vnějším povrchem a okolním vzduchem řízen součinitelem přestupu tepla (α_k). Jako dva modely konvekčního přenosu ve vzduchu jsou považovány: volná konvekce, ve kterém je cirkulace poháněna pouze teplotními gradienty – pro tento případ je α_k obvykle $5 Wm^{-2}K^{-1}$ a nucená konvekce, ve kterém je cirkulace poháněna vnějšími prostředky – zde je α_k obvykle $50 Wm^{-2}K^{-1}$. Tento model ukázal, že přenos tepla konvekcí často upravuje teplotní spád (nerovnovážený stav) směrem k rovnovážnému stavu a stává se limitujícím faktorem u materiálů chlazených vzduchem. [6, 13]

1.3 Sdílení tepla zářením

Sdílení tepla zářením (sáláním, radiací) je způsob sdílení tepla výrazně odlišný od kondukce a konvekce. Zatímco pro kondukcii a konvekci je médiem materiál, v tomto případě může být teplo převedeno přes dokonalé vakuum. Mechanismus je v tomto případě založen na elektromagnetickém vlnění cestujícím rychlostí světla. Elektromagnetické vlnění se šíří v důsledku teplotního rozdílu mezi teplosměnnými tělesy. [1] Pro sdílení tepla zářením je rozhodující záření ultrafialové, tepelné (infračervené) a viditelné (světelné), tedy v rozsahu vlnových délek $10^{-4} - 10^{-7} m$.

Záření dopadá na povrch tělesa a ten část záření pohltí, odrazí nebo propustí. Celková hodnota **zářivého toku P** je tedy rozdělena do tří složek, které musí dát dohromady 100 %, tedy:

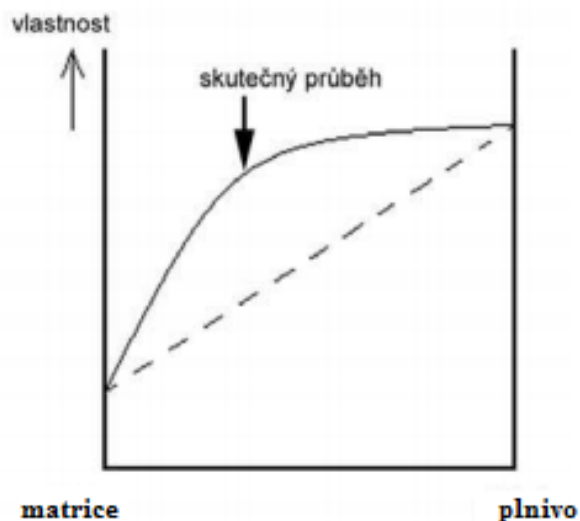
$$P = A \cdot P + R \cdot P + T \cdot P \quad (8)$$
$$\text{Kde : } A + R + T = 1$$

Kde A je pohltivost, R je odrazivost a T je propustnost. [6]

Záření je velmi závislé na teplotě, vliv teploty je podstatně větší než u kondukce nebo konvekce. Se zvýšením teploty se zvýší i vnitřní energie tělesa a tím i vyzařovaná energie radiací. Při nízkých teplotách hrají hlavní roli konvekce a kondukce, při vysokých teplotách je většinou významnější záření. [5]

2 KOMPOZITY

Kompozity jsou složené materiály, které obsahují více fází, z nichž alespoň jedna je pevná s makroskopicky rozeznatelným rozhraním mezi fázemi a jednotlivé složky si ponechávají své vlastnosti. Materiály jsou vloženy do materiálového systému za účelem zlepšení jeho vlastností tak, že se uplatní jen jejich přednosti a potlačí jejich nedostatky. Kompozitní materiál tak získá vlastní, lepší vlastnosti, než může poskytnout každá složka zvlášť, nebo než jejich prostý součet – synergický efekt (Obr. 3). Tvoří se fyzikální kombinací kompatibilních materiálů, které se mohou lišit složením, vlastnostmi a někdy i tvarem. [14]



Obr. 3 Znárodnění synergického efektu v kompozitu. [15]

Nejčastější používaný model kompozitu je dvou a vícefázový, z nichž jedna fáze je kontinuální (matrice) a ostatní fáze, které jsou rozptýleny v této matrici, jsou diskontinuální (plniva). Prostorové uspořádání plniva v matrici je jeho hlavním určujícím prvkem. [16]

Kompozitní vlastnosti jsou závislé na matrici, plnivu a **adhezi** mezi matricí a plnivem. Soudržnost plniva s matricí závisí na možnosti přenášení sil přes fázové rozhraní, tedy na adhezních silách na mezifázích. Ty mohou být způsobeny mechanickým zaklíněním, fyzikálním působením nebo chemickým a fyzikálně chemickým působením. [15]

Tepelně vodivé kompozity:

Běžně jsou plasty vnímány jako tepelné izolace a k odvodu tepla se využívají kovové materiály. Nicméně poptávka po polymerech, které jsou tepelně vodivé, na trhu stále roste, a tak se výroba kompozitů s příslušnou polymerní matricí a vhodným plnivem stala hlavní

cestou ke zvýšení tepelné vodivosti polymerů. [10, 13] Mezi výhody tepelně vodivých kompozitů ve srovnání s kovovými materiály patří:

- možnost použití materiálu o nižší hmotnosti k dosažení lepších nebo podobných výkonových parametrů konstrukčního systému
- odolnost vůči korozi a chemikáliím
- konstrukční variabilita, dobré povrchové vlastnosti, barevnost, menší potřeba následních montážních operací
- recyklovatelnost, svařitelnost, malá zmetkovitost. [10, 17]

2.1 Polymerní matrice

Polymerní matrice zajišťuje soudržnost plniva, jeho orientaci a také ho chrání před mechanickým poškozením. Kombinací často křehké výztuže s polymerní matricí pak vzniká houževnatý materiál. Významnou úlohou matrice je také ochrana vláken proti oxidaci a korozi. Polymerní matrice může být termoplastická nebo reaktoplastická. [14, 16] **Termoplasty** působením tepla měknou a tuhnou opětovným chlazením. Tento proces je vratný a může být opakován mnohokrát. Naopak **reaktoplasty** první změknou a roztají, a pak se následným zahřátím na určitou teplotu nenávratně vytvrzují a stanou se nerozpustnými a netavitelnými. [18] Tato práce je věnována termoplastickým materiálům.

2.1.1 Termoplastické materiály

Charakteristickým znakem termoplastů je, že zatímco samotné řetězce drží pohromadě primární vazby (kovalentní), jednotlivé makromolekuly jsou vázány sekundárními vazbami a jejich vzájemné interakce jsou většinou slabé, Van der Waalovy síly, vodíkové můstky, atd. Když jsou molekuly aktivovány teplem, tyto vazby jsou oslabeny, materiál změkne a nakonec roztaje. Při zvýšení teploty nad hodnotu charakteristickou pro daný polymer a opětovným chlazením opět přejdou do pevného skupenství. U semikrystalických polymerů jako je PP, PE, PEEK, PA, atd. je obvykle touto teplotou teplota tání (T_m) a u amorfních polymerů jako PMMA, PS, PC, atp. teplota skelného přechodu (T_g).

Obecně platí, že T_m se zvyšuje s délkou řetězce, většími přitažlivými silami mezi řetězci, tuhostí řetězce a stoupající krystalinitou. T_g se zvyšuje s většími přitažlivými silami mezi

molekulami, klesající pohyblivostí řetězce, zvyšující se tuhostí řetězce a rostoucí délkou řetězce.

Krystalinita ovlivňuje vlastnosti polymerů, např. zvyšuje hustotu, pevnost, tuhost, odolnost proti tečení a odolnost proti teplotě. Amorfni termoplasty naopak vykazují dobrou tažnost, houževnatost, odolnost proti nárazu a jsou průhledné. [9, 18, 19]

Termoplasty mohou být dále klasifikovány podle jejich spotřeby na:

- komoditní – PE, PP, PVC, PS,
- konstrukční – PA, PMMA, POM, PC, PPO, PPE, PET, PBT,
- speciální – PSU, PPS, PTFE, PEEK, PEI, PAI, LCP. [17]

Termoplastické polymerní matrice mohou značně redukovat cenu kompozitů (o 25 až 80 % proti reaktoplastickým), je to jeden z důvodů, proč je jim v poslední době věnována zvýšená pozornost. Cenové úspory jsou hlavně výsledkem snadnější výroby i složitých tvarů. [14] Zpracování termoplastů je teoreticky jednodušší a rychlejší, protože mohou být vyrobeny během několika minut nebo dokonce sekund, zatímco výroba u reaktoplastů kvůli síťování trvá i hodiny. Výhodou je také zdravotní nezávadnost a nízká absorpce vlhkosti. Tepelně vodivé materiály s termoplastickou matricí obvykle obsahují vhodná aditiva, která upravují tyto vlastnosti – UV stabilizace, odolnost proti hoření nebo barvení. Rozsah použití je dán tepelnou odolností matrice. [9, 10]

2.2 Tepelně vodivá plniva

Aby byly kompozity splňovaly požadavky pro aplikace vyžadující odvod tepla, je nutné použít plniva s dostatečně velkou tepelnou vodivostí. Když byly zkoušeny minerální plniva nebo skleněná vlákna, hodnota tepelné vodivosti kompozitu byla stále nedostačující ($0,6 \text{ Wm}^{-1} \text{ K}^{-1}$). Pomocí jiných vhodnějších plniv, byly vyvinuty kompozity s ideální tepelnou vodivostí od 1 do $10 \text{ Wm}^{-1} \text{ K}^{-1}$, v některých případech i vyšší. Tabulka 2 navrhuje několik možných řešení zvýšení tepelné vodivosti termoplastů: [13, 17]

Plnivo	Součinitel tepelné vodivosti [$\text{Wm}^{-1} \text{ K}^{-1}$]		
	Kovy	Keramika	Uhlík
Titanové slitiny	5.8		
Nerezová ocel	11–24		
Titan	15,6–22,5		

Oxid zinečnatý		21	
Oxid hlinitý		26–40	
Nitrid křemičitý		33	
Olovo	30–35		
Bronz	26–50		
PAN vlákna			8–167
Ocel	36–55		
Železo	35–80		
Nikl	91		
Karbid křemíku		60–120	
Borid hlinitý		60–120	
Mosaz	109–125		
Nitrid hlinitý		50–260	
Hliník	204–250		
Nitrid bóru		125–300	
Zlato	315		
Měď	353–390		
Grafit			100–400
Stříbro	406–430		
Dehtová vlákna			530–1 100
Diamant			2 000
Grafen			2 000–5 300
Uhlíkové nanotrubičky			2 000–6 000

Tab. 2 Tepelná vodivost různých plniv. [13, 20]

Existují tedy tři obecné kategorie plniv, které se používají ke zvýšení tepelné vodivosti termoplastů:

- uhlíková (elektricky vodivá),
- kovová (elektricky vodivá),
- keramická (elektrické izolanty). [10, 13]

U elektricky i tepelně vodivých plniv platí, že vodivost kompozitu se zlepšuje vytvořením efektivní trojrozměrné vodivé sítě. Je to proto, že elektrickou vodivost v kompozitech způsobuje přímý kontakt vodivých částic v kompozitu nebo dostatečně malé mezery mezi nimi. U tepelně vodivých kompozitů přenáší teplo fonony a trojrozměrná vodivá síť usnadňuje jejich dopravu. Vodivost se tak synergicky zvyšuje. Dále se na zvýšení tepelné vodivosti celého kompozitu podílejí i vodivá plniva různých velikostí, tento synergický efekt je spojen s hustotou kompozitu. [21, 22]

Při geometrickém popisu systému je třeba brát v potaz charakteristiky dispergované fáze:

- *Tvar plniva* – tvar jednotlivých částí plniva se ve velké míře podílí na anizotropii vlastností i na způsobu interakce mezi maticí a plnivem. Podle tvaru rozlišujeme **částicové a vláknové kompozity**.

Vlákná mohou být kontinuální, u nichž je délka srovnatelná s velikostí výrobku a diskontinuální, která mohou být krátká nebo dlouhá. Uspořádání kontinuálních vláken v kompozitu má řadu variant, na obrázku 4 jsou ukázány dvě z nich. Jejich použití jako vodivých plniv v termoplastických kompozitech je však velmi vzácné.



Obr. 4 Rozdělení kompozitních materiálů podle geometrického tvaru plniva. [23]

- *Velikost a distribuce velikosti plniva* – v průmyslu jsou nejvýznamnější **mikrokompozitní** materiály, u kterých jsou největší příčné rozměry plniva (vláken nebo částic) v rozmezí 0,1 až 1 μm a **nanokompozitní** materiály, které mají rozměr plniva v jednotkách nm. [13, 14, 15, 23]

2.2.1 Částicová plniva

Mezi vhodná vodivá plniva se nejčastěji řadí částicová plniva na kovové nebo keramické bázi – stříbro, měď, hliník, oxid hlinitý, nitrid hlinitý, nitrid bóru. Koncentrace částicových plniv v kompozitu mohou dosahovat i více než 60 hm. %. Použitím částic v kompozitech se mohou zlepšit nejen mechanické vlastnosti, ale častěji i jiné vlastnosti (tepelná vodivost, tepelná odolnost, elektrická vodivost, útlum vibrací atp.), sníží se také cena výrobku. Nevýhodou však může být zvýšení viskozity taveniny (zhoršují její tekutost), snížení pevnosti a zvýšení hmotnosti kompozitu oproti polymeru. O způsobu soudržnosti disperze s maticí rozhoduje ve velké míře velikost a tvar částic a složitost jejich povrchu (mechanické zaklínění částic). Plniva tohoto typu mají tvar kulovitý nebo destičkovitý (grafit). [10, 14, 15, 24]

Při aplikaci částicových kompozitů s termoplastickou maticí patří **tečení materiálu za studena** (kríp) k významným problémům, a to zejména při konstantním zatížení plastového dílce za zvýšené teploty. Důsledkem krípu může nastat až lom dílce. Čím méně flexibilní je struktura polymeru, tím menší je jeho kríp. Plnivo znehybní segmenty makromolekul, a tak kríp snižuje, hlavně pokud mezi maticí a plnivem existuje silná adheze na mezifázi. [19]

2.2.2 Vláknohá plniva

Vlastnosti vláknových kompozitů, jež jsou nehomogenní a anizotropní, závisí na:

- výrobním postupu – ovlivňuje rozložení vláken, orientaci vláken, distribuci délek, stupeň porušení vláken,
- vlastnostech látek – pevnost, houževnatost, teplotní vodivost,
- povrchové úpravě vláken – ovlivňuje soudržnost s maticí,
- viskoelastickém chování matrice – závisí na teplotě. [14]

Vláknitá plniva jsou obecně účinnější, protože k dosažení tepelné vodivosti není potřebné tak velké množství plniva. Koncentrace vláken v kompozitu se obvykle pohybuje od 5 do 60 hm. %. Z důvodu velkého poměru délky k průměru vláken mají vstříkované díly orientační závislost. Vlákna dále přinášejí vyztužení, to vede ke zvýšení pevnosti v tahu a pevnosti v ohybu, jsou stálé za vysokých teplot i ve vlhkém a teplém klimatu a odolávají krípu. [13, 24]

Největší překážkou většího rozšíření vláknových kompozitů s termoplastickou maticí je především velká viskozita taveniny při zpracování, která je o 2–4 řády vyšší než u reaktoplastů. To způsobuje vznik defektů při smáčení vlákna a tedy ke vzniku kompozitů s nedostatečnými vlastnostmi. Z tohoto důvodu se používají jako vstupní surovina už termoplastem naimpregnovaná vlákna, což vede ke zvýšení ceny hotových profilů. [19]

Whiskery jsou tenké, velmi pevné monokrystaly s jednou šroubovicovou dislokací podél osy whiskeru, tj. posun částic uvnitř krystalu. Tato dislokace je uprostřed upevněná a je tak neschopná skluzu při běžně velkém tahovém namáhání. Whiskery se vyznačují vysokým poměrem délky k průměru, na délku mají 3–4 mm, v průměru pod 1 μm . Vyrábí se

kondenzací z par ve vakuu a nejčastěji z karbidu křemíku nebo oxidu hliníku, ale lze je vyrobit i z jiných materiálů. [14, 15]

2.2.3 Efektivní tepelná vodivost kompozitů

Tepelná vodivost kompozitů silně závisí na geometrickém rozmístění plniva v matrici a jeho tvaru. V případě **vláknových kompozitů** se pro výpočet tepelné vodivosti kompozitu při určitém plnění používá v podélném směru sériový model a v příčném směru paralelní model. Tyto dva modely vyjadřují spodní a horní hranice efektivní tepelné vodivosti. Pro sériový model platí:

$$\lambda_c = \frac{\lambda_p \lambda_f}{\lambda_p (\phi) + \lambda_f (1 - \phi)} \quad (9)$$

Pro paralelní model:

$$\lambda_c = \phi \cdot \lambda_f + (1 - \phi) \cdot \lambda_p \quad (10)$$

Pro **částicová plniva** odvodil Maxwell vztah:

$$\lambda_c = \lambda_p \frac{\lambda_f + 2\lambda_p + 2\phi(\lambda_f - \lambda_p)}{\lambda_f + 2\lambda_p - \phi(\lambda_f - \lambda_p)} \quad (11)$$

Kde λ_c , λ_p a λ_f jsou tepelné vodivosti kompozitu (composite), polymerní matrice (polymer matrix) a plniva (filler) a ϕ je objemový zlomek plniva. [16, 25]

2.2.4 Uhlíková plniva

Plniva na bázi uhlíku jsou nejvhodnějšími plnivými pro výrobu tepelně vodivých kompozitů. Například saze (amorfní uhlík) mohou tepelnou vodivost zvýšit až dvojnásobně. Výhodou uhlíkových plniv kromě vysoké tepelné vodivosti je velká pevnost, malá objemová hmotnost, malá tepelná roztažnost, vysoká chemická odolnost, ale také neměnnost vlastností i ve vysokých teplotách, kdy své původní vlastnosti ostatní materiály zcela ztrácejí. Uhlík se vyznačuje se výbornou elektrickou vodivostí, která se může uplatnit všude, kde není nutná elektrická izolace. Navíc má oproti kovovým nebo keramickým materiálům nižší hustotu, a proto je mu v poslední době věnována velká pozornost. [10, 22]

2.2.4.1 Uhlíková a grafitová vlákna

Uhlíková vlákna jsou složena z atomů uhlíku spojených do mikroskopických krystalů, které jsou rovnoběžné k ose vlákna. [17] Výhodou uhlíkových vláken mimo jiné je vysoký modul pružnosti a velká únavová odolnost. Únavový lom v plastech je iniciován vznikem vnitřního tepla. Tepelná vodivost vede k většímu odvodu tepla, a tím se zlepši také únavová pevnost (až o 50 %).

Nevýhodou je citlivost k poškození během zpracování a vysoká tuhost vláken, která může způsobovat obtíže při vytváření ohybů malých poloměrů. Soudržnost s matricí je bez předběžné úpravy malá. Nejlépe se zlepši soudržnost mírnou oxidací povrchu vláken a poté pokrytím vláken vhodnými nánosy (např. polyamidy, polyimidy, fenolovými polyestery). [10, 14]

Vlákna na bázi uhlíku se dělí podle procenta grafitu na:

- **Uhlíková** – více amorfního uhlíku, velká tahová pevnost.
- **Grafitová** – převaha krystalického grafitu, menší pevnost než u uhlíkových vláken. Vlákna jsou silně anizotropní. Vznikají při vyšších teplotách než uhlíková při tzv. grafitizaci a jsou dražší. [15, 19]

Příprava a zpracování uhlíkových vláken:

Uhlíková vlákna se vyrábějí nejčastěji z viskózních, polyakrylonitrilových (PAN) vláken nebo z dehtových vláken (PCF). [19] Dehtová vlákna mají o hodně vyšší tepelnou vodivost ($900\text{--}1000 \text{ Wm}^{-1} \text{ K}^{-1}$) ve srovnání s PAN vlákny ($10\text{--}170 \text{ Wm}^{-1} \text{ K}^{-1}$).

Uhlíková vlákna se mohou připravovat pyrolýzou polymerů (nejčastější metoda), tepelným rozkladem uhlovodíků (možnost vzniku nanovláken) a odpařováním z obloukového výboje mezi uhlíkovými elektrodami (výroba whiskerů).

Výroba pyrolýzou PAN:

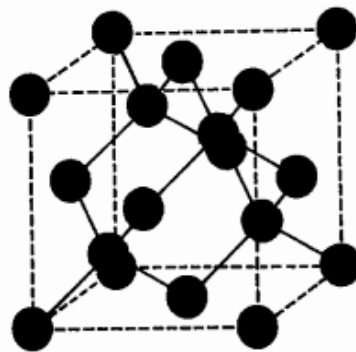
- *Prekursor* – zvláknění PAN z roztoku.
- *Stabilizace* – při 200–300 °C na vzduchu. Makromolekuly se zesítují kyslíkovými můstky, vlákno zčerná a stane se netavitelné.

- *Karbonizace* – při 1200 až 1500 °C v dusíku, rozklad makromolekul – odstraní se vodík a sníží obsah kyslíku a dusíku, C tvoří 80 až 95 %. V tomto kroku vznikají **uhlíková vlákna**.
- *Grafitizace* – při 2000 až 3000 °C v dusíku s argonem. Opět s zvýší obsah C a dochází k překrystalizaci na **grafit**. [15]

2.2.4.2 Nanodiamanty

Jedny z nejlepších částicových plniv jsou nanočástice uhlíku (až $695 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$) – nanodiamanty. [10] Diamant je nejtvrďší materiál na světě, který vznikl krystalizací v horninách hluboko pod zemí za vysokých tlaků. Jak je vidět na obrázku 5, jednotlivé atomy uhlíku jsou vázány silnou kovalentní vazbou v kubické mřížce. Díky malé velikosti nanodiamantů (5 nm) je dosaženo kratších mezičásticových vzdáleností a přímých kontaktů mezi částicemi i při nižším obsahu nanodiamantů, na rozdíl od jiných nanoplňiv (např. průměr křemene je 10 nm). [26]

Nanočástice mohou zlepšit mechanické vlastnosti matrice a redukovat obsah přísad nutný k dosažení požadovaných vlastností a tím jejich použití vede ke snížení hmotnosti kompozitu. Zlepšují také nepropustnost, odolnost vůči chemikáliím a zvyšují kvalitu povrchu a lesk kompozitu. [24, 27]



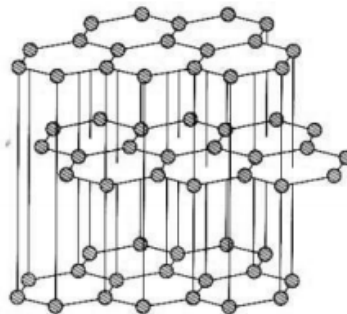
Obr. 5 Kubická mřížka diamantu. [27]

2.2.4.3 Grafit

Grafit je šesterečný, nekovový minerál. Na obrázku 6 je ilustrována anizotropní vrstvená struktura z odolných hexagonálních mřížek z atomů uhlíku. V podstatě jsou to listy grafenu nad sebou. Tepelná vodivost, stejně jako mechanické vlastnosti, je směrově závislá.

V rovnoběžném směru k rovinám grafenu je grafit dobře tepelně vodivý (140 až $500 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$), ale ve směru kolmém k rovinám je považován za izolační materiál. [27, 28]

Atomy umístěné v paralelních rovinách jsou vázány slabšími silami (Van der Waalsovy) než v rovině mezi sebou (kovalentní vazby), a tak je jedna rovina vůči druhé snadno pohyblivá. Proto má například polypropylenový kompozit se 7% grafitových částic o velikosti kolem $15 \mu\text{m}$ zhruba o 20% horší mechanické vlastnosti než čistý polypropylen. [10, 28]

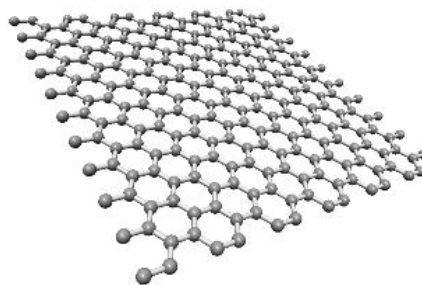


Obr 6 Struktura grafitu. [27]

Během experimentální studie bylo zjištěno, že tepelná vodivost vysokohustotního polyethylenu při $37 \text{ obj. } \%$ grafitu dosáhla hodnoty přibližně $2,3 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$. Při $30 \text{ obj. } \%$ grafitu v lineárním nízkohustotním polyethyleny se zvýšila hodnota tepelné vodivosti kompozitu až na $6,5 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$. [29]

2.2.4.4 Grafen

V současnosti je hojně studovaným nanoplnivem také grafen. Je to dvourozměrný krystal, ve kterém, jak je vidět na obrázku 7, jsou atomy uhlíku uspořádány do hexagonální mřížky. Vyznačuje se mimořádně vysokou pevností, mechanickou odolností a tepelnou vodivostí ($5300 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$). [6, 30, 31]



Obr 7 Struktura grafenu. [32]

Obecně platí, že zlepšení finálních vlastností kompozitů souvisí se stupněm dispergace nanoplňiva v matrici. Bohužel velká plocha grafenu a Van der Waalsovy síly vedou ke vzniku aglomerátů v matrici kompozitu. Kromě toho jsou atomy uhlíku v grafenu (stejně tak v diamantu a v grafitu) chemicky stabilní. Výsledkem je, že jsou tyto plniva vůči matrici inertní a nemohou zajistit efektivní přenos sil přes mezifázové rozhraní. Řešením může být titaničitanové kompatibilizační činidlo, které slouží jako molekulární most mezi plnivem a polymerem, a tak zlepšuje jejich soudržnost. [33]

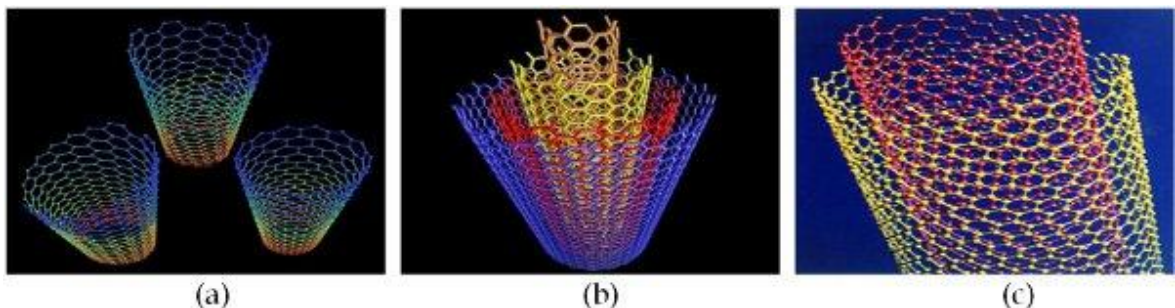
Tepelná vodivost kompozitu plněného grafenovými nanodestičkami se také může zlepšit přidáním druhého plniva – dehtových vláken. Experimentální studií bylo zjištěno, že při vhodném obsahu těchto plniv (15 hm % grafenu s 5 hm % PCF) měly kompozity nejlepší možné třídídimenzionální síť pro efektivnější dopravu fononů. [22]

2.2.4.5 Uhlíkové nanotrubic

V posledním desetiletí byla zaměřena pozornost na postup modifikací různých polymerních matric s uhlíkovými nanotubicemi (CNTs). Jde o grafenové listy stočené do tvaru válce. Nanotrubic měří v průměru několik nanometrů a na délku několik mikrometrů. Jejich vynikající fyzikální a chemické vlastnosti z nich dělají plniva pro kompozity se zvýšenými mechanickými, elektrickými a tepelnými vlastnostmi. [17, 22, 34]

Výroba probíhá syntézou plynů, například etylenu, s použitím železa jako katalyzátoru a za vysoké teploty ve fluidním loži. Jak je znázorněno na obrázku 8, uhlíkové nanotrubic se vyrábí ve třech provedeních:

- a) s jednou stěnou,
- b) s mnoha stěnami,
- c) se dvěma stěnami. [10]



Obr 8 Uhlíkové nanotrubic v různých provedeních. [35]

Uhlíkové nanotrubic jsou jedny z nejlepších vodivých plniv, mají tepelnou vodivost až $6000 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ pro jedностěnné nanotrubic a $3000 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ pro víceštěnné nanotrubic. Také se vyznačují velkým poměrem délky k průměru, což je pro tepelnou vodivost CNTs kompozitů velmi příznivé. [36] Tento velký poměr totiž vytváří efektivní třídímenzionální tepelnou síť. Už i malé množství uhlíkových nanotrubic s velkým poměrem stran vede k synergickému zlepšení tepelné vodivosti kompozitu. Například vysokohustotní polyethylen plněný CNTs s jednou stěnou dosáhne tepelné vodivosti $3,5 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ už při 20 obj. % plniva v matici. [22, 29]

2.2.5 Kovová plniva

Kovová plniva patří k nejlacinějším, ale mají poměrně velkou hmotnost a jsou náchylná k oxidaci. Hustota a tvrdost matrice se zvyšuje s obsahem kovových částic. Naopak rázová houževnatost a prodloužení při přetržení se snižuje. Stříbro, měď a hliník vykazují nejvyšší tepelnou vodivost (viz tabulka 2). [13, 15, 21] V případě měděných destiček při 60 obj. % se tepelná vodivost kompozitu může zvýšit až na $12 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$. [37] Hliník má oproti ostatním kovům nižší hustotu, proto se nejčastěji používají hliníkové částice v různých tvarech:

- vločky s širokou distribucí velikosti částic
- granulované prášky

Vyznačují se elektrickou vodivostí, ale vysokým elektrickým odporem na jemné vrstvě oxidu hlinitého na povrchu. [17] Experimentálně bylo navíc zjištěno, že elektrickou vodivost snižuje větší velikost částic a orientace ve směru kolmém ke směru přenosu elektronů. Proto může být hliník s porovnáním s železnými částicemi označován za elektrický izolant. U tepelné vodivosti tyto faktory neměly až takový vliv. Přidání 50 obj. % hliníku do polymeru zvýšilo tepelnou vodivost polymeru až o 706 % a stejným objemovým plněním železa se dosáhlo 730% zvýšení oproti čistému polymeru. [21]

2.2.6 Keramická plniva

Keramika má oproti jiným plnivům značné výhody, protože odolává i vysokým teplotám a je teplotně stabilní. Na rozdíl od uhlíku vydrží i větší tlak a je to elektrický izolant. [15] Tepelně vodivé/elektricky izolační materiály se využívají v oblastech elektroniky (plošné

spoje) a elektrických izolátorů (součástka vyrobená z izolantu) k řešení problémů přehřívání v elektronických součástkách. Další výjimečnou vlastností je schopnost nitridu bóru a karbidu bóru pohlcovat neutronové záření. [17, 21]

Nitrid bóru (BN) používaný jako tepelně vodivé plnivo má obvykle hexagonální strukturu s těsným uspořádáním (podobně jako grafen), která je více stabilní než kubická mřížka. Hodnota tepelné vodivosti BN měřeného v rovině destiček je vyšší než $300 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$. Experimentálně byla naměřena tepelná vodivost kompozitu $2 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ s 30 obj. % částic BN o velikosti 7–10 μm v polypropylenové matrici. [38] Jiná studie ukázala, že tepelná vodivost kompozitu při 27 obj. % oxidu zinečnatého v polyimidové matrici obvykle nepřekročí hodnotu $1,54 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$. Kompozity s keramickým plnivem jsou tedy méně tepelně vodivé než ty s uhlíkovým nebo kovovým. [29]

Cena keramických plniv je poměrně vysoká v závislosti na typu, čistotě a množství. Nevýhodou je také toxicita při vdechnutí některých prášků, např. oxidu berylnatého, a zhoršení mechanických vlastností jako pevnost, modul pružnosti a rázová houževnatost. [17] Pokud chceme vytvořit keramický kompozit s dostatečně vysokou tepelnou vodivostí, která by se dala využít ve speciálních aplikacích, je nutné kontrolovat mezifázové chování mezi hydrofobní keramikou a hydrofilním polymerem. Rozdíl v povrchových vlastnostech je totiž velmi důležitý. Tyto vlastnosti mohou být řízeny s použitím amfifilních činidel. V podstatě platí, že amfifilní látka je složená z hydrofobní skupiny, která působí pro hydrofobní keramiku a z hydrofilní skupiny určené pro polymer. Prostřednictvím těchto amfifilních činidel tak může dojít k zlepšení chování na mezifázi keramického kompozitu. [39]

3 ZPRACOVATELSKÉ TECHNOLOGIE

Kompozity obecně lze vyrábět různými technologiemi. Tato práce je zaměřená na tepelně vodivé termoplasty, a tak se věnuje pouze technologiím, které jsou pro výrobu těchto typů kompozitů nejvhodnější. Použití technologie pro určité průmyslové odvětví závisí na rozměrech výrobků, jejich požadované přesnosti, množství vyráběných kusů a zatížení konstrukce. [40]

3.1 Příprava kompozitních směsí

Kompozitní směs je systém obsahující polymer a částicová nebo vláknová plniva. Do směsi mohou být přidány také další přísady, které ovlivňují vlastnosti kompozitu, např. antidegradanty, změkčovadla, různá činidla, retardéry hoření atp. Jednotlivé operace vedou ke zvýšení produktivity zpracovatelských technologií. [41]

3.1.1 Mísení plniva s taveninou

Mísení plniva s taveninou je u termoplastických materiálů velmi dobře použitelné, jelikož je lze opakovaně převádět do taveniny. Do roztavené polymerní matrice mohou být přimíchána jakákoliv plniva. [42] Nejčastěji se používají dvoušnekové stroje s různými hnětacími vložkami k posílení hnětacího účinku (kontinuální hnětiče), které mají za úkol smísit plasty s přísadami a intenzivním mícháním převést polymer do plastického stavu – plastikace. Jsou výkonné, plně automatizované a zajišťují homogenitu materiálu. Ke hnětení dochází mezi hnětacími vložkami a komorou. [43]

Amorfní polymery se zpracovávají nad teplotu skelného přechodu a semikrystalické polymery nad teplotu tání. Výhodou této přípravy kompozitů je rychlost, jednoduchost a snadná integrace do standardních průmyslových zařízení (vytlačovací stroje). Nevýhodou je, že za vysokých teplot může tento postup vyústit v neočekávanou degradaci polymeru a oxidaci. [42]

3.1.2 Granulace polymerních směsí

Prostřednictvím granulace se převádí kompozitní směsí na tzv. granulát, jehož tvar je vhodný pro další zpracování. Granule jsou částice velké většinou několik milimetrů. Mají stejnoměrný tvar, který je vhodný pro plnění násypek vstřikovacích strojů, jelikož

pravidelně dodává materiál ke zpracování, aniž by se lepil na stěny násypky. Navíc se dá snadno smísit s dalšími přísadami, např. pigmenty.

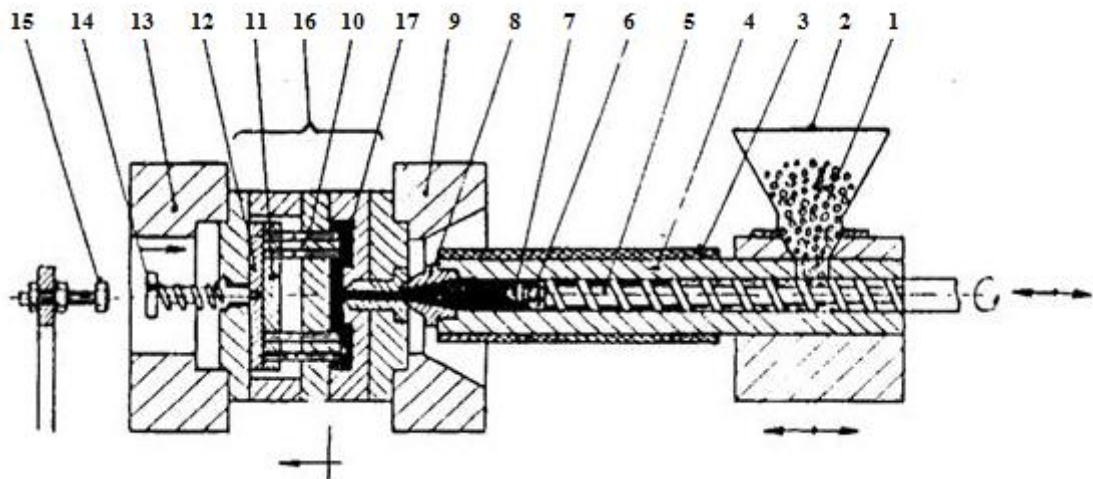
Všechny granulační zařízení fungují na stejném principu. Materiál s částicovým nebo vláknovým plnivem je vytlačovací hlavou (profilovacím zařízením) vytlačován ve formě struny nebo pásku, zchladí se v chladicí lázni a nakonec se seká na stejnosměrné kusy. Obvykle ke granulaci kompozitů slouží dvoušnekový vytlačovací stroj. Granulát je po granulaci vlhký, a proto následuje sušení. [41, 43]

3.2 Vstřikování

Vstřikování je nejvýznamnější technologií pro zpracování tepelně vodivých termoplastických kompozitů. Umožňuje vyrábět kvalitní a rozměrově přesné výrobky a na moderních strojích je výroba většinou plně automatizovaná. Jedná se o diskontinuální výrobu (cyklickou). Během procesu je tavenina vstříknuta do uzavřené dutiny chlazené kovové formy, kde dojde ke ztuhnutí finálního výrobku. Náklady na strojní zařízení a vstřikovací formy jsou velké, ale pokud je výroba velkosériová, je tento způsob zpracovatelské technologie produktivní. [41, 43]

Obrázek 9 ilustruje jednotlivé části vstřikovacího stroje se šnekovou plastikací. Je složen ze šnekového stroje, uzavírací jednotky a z řídicí a kontrolní jednotky. Šnekový stroj se otáčí a z násypky nabírá granulát kompozitu, který dopravuje do tavicí komory. V přehřáté části tavicí komory jej přemění na taveninu s určitou viskozitou (plastikace) a tu pak vstřikovací tryskou vysokou rychlostí a tlakem vstříkne do dutiny formy. Uzavírací jednotka zavírá a otevírá formu. Uzavře ji natolik silně, že se forma při vstříknutí taveniny velkým tlakem neotevře.

Vstřikovací forma by měla splňovat požadavky, jako je odolnost vůči vysokým tlakům, výroba kompozitů o přesných rozměrech a snadné vyjmutí výstřiku. Materiál formy se volí podle typu zpracovávaného plastu, na velikosti a tvaru výrobku, tepelné odolnosti, odolnosti proti opotřebení a korozi, na velikosti série a ceně atp. Forma se skládá z dílů určujících tvar, z chladicího systému, vtokového systému, vyhazovacího systému a z upínacích a vodících částí. [43]



Obr. 9 Schéma vstřikovacího stroje se šnekovou plastikací. Šnekový stroj: 1 – granule plastu, 2 – násypka, 3 – topná tělesa, 4 – tavící komora, 5 – šnek, 6 – zpětný uzávěr, 7 – špice šneku, 8 – vstřikovací tryska; Uzavírací jednotka: 9, 13 – upínací desky, 10 – vyhazovače, 11 – kotevní deska, 12 – deska vyhazovačů, 14 – tyč vyhazovače, 15 – doraz; 16 – forma, 17 – výstřík. [43]

Během vstřikování tepelně vodivých termoplastů je třeba dodržovat technologický postup, který se od vstřikování standardních materiálů v některých aspektech liší. Například jsou požadovány velké průřezy ústí vtoku, nízký odpor na šneku a u tepelně i elektricky vodivých materiálů by měla být teplota taveniny pro udržení požadovaných elektrických vlastností o 10 až 25 °C vyšší než při výrobě nevodivých kompozitů. Během konstrukce vstřikovací formy je třeba myslet na všechny tři formy odvodu tepla: vedením, prouděním a zářením, záření se však kvůli své malé hodnotě zanedbává. Je také výhodné si ověřit:

- Tepelné vlastnosti kompozitu.
- Plnění formy polymerní taveninou.
- Systém temperace formy.
- Smrštění – změna objemu při tuhnutí polymerní taveniny, týká se všech termoplastů (u nanokompozitů je menší). Smrštění obvykle nepřesahuje 0,5 %.
- Deformaci – změna tvaru při zachování objemu výstříku, je důsledkem smrštění.
- Rozložení plniva.

Během vstřikování vláknových kompozitů do formy se vlákna částečně orientují ve směru toku v důsledku vysoké viskozity termoplastu. Tento jev má v jistém směru pozitivní vliv na tepelnou vodivost kompozitu, která je u vláknových kompozitů směrově závislá. Ve směru orientace vláken v kompozitu lze naměřit podstatně vyšší hodnoty než ve směru příčném. [13, 15]

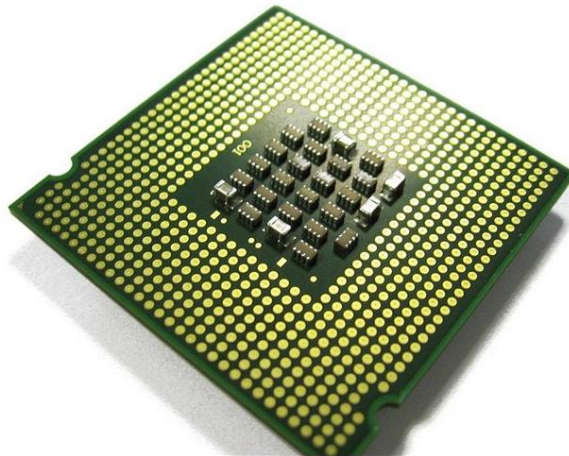
3.3 Polymerace in situ

Za poslední desetiletí byla intenzivně zkoumána polymerace in situ v přítomnosti CNTs plniva. Hlavní výhodou této metody je, že umožňuje roubování makromolekul polymeru na stěny CNTs. To poskytuje lepší disperzi nanotrubic a vytvoření mezifázového rozhraní. Celá výroba probíhá v jednom kroku, a tak odpadá příprava směsi. Metoda proto není tolik nákladná a časově náročná. Použití polymerace in situ vede k lepším termomechanickým a elektricky vodivým vlastnostem, a to i při velmi nízkém plnění nanotrubic. [42]

4 APLIKACE TEPELNĚ VODIVÝCH TERMOPLASTŮ

V posledních 20 letech tepelně vodivé termoplastické materiály nahrazují kovy, nejčastěji hliník a jeho slitiny, v mnoha částech designu v různých průmyslových odvětvích. Hlavním důvodem je pro termoplasty typická flexibilita designu, která může spolu s vhodným tepelně vodivým plnivem splnit požadavky dané aplikace. Další výhodou ve srovnání s kovovými materiály jsou nižší náklady na výrobu. [10, 13]

Elektronické součástky během provozu produkují teplo, to musí být odváděno z důvodu udržení vysokého výkonu zařízení a zamezení předčasného selhání jeho součástí. Proto se stal účinný přenos tepla klíčovým požadavkem u nových technologií, jejichž rozměr se stále zmenšuje, zatímco jejich výkon se zvětšuje. [6] Takovýmto případem jsou počítače, které jsou stále menší, lehčí a rychlejší. Čím jsou *procesory* rychlejší, tím je množství tepla produkovaného čipem větší, a tak se zvyšují i nároky na chladicí systémy. [13] Na obrázku 10 je příklad takového procesoru s čipy.



Obr. 10 Procesor. [44]

Další oblastí, ve které by mohly být tepelně vodivé termoplasty užitečné, je trh s osvětlením (např. osvětlovací systémy automobilů). Na obrázku 11 lze vidět několik příkladů vysoce výkonných *LED osvětlení*. V těchto systémech jsou nezbytné chladiče vyznačující se nízkou cenou, váhou a vysokou flexibilitou. Proto jsou tepelně vodivé termoplasty výbornými kandidáty pro toto použití ve srovnání s běžně používanými chladiči na hliníkové bázi. Použití hliníkových profilů je navíc složité a časově náročné. [10, 13, 33]



Obr. 11 LED osvětlení automobilů. [45]

ZÁVĚR

Tato práce se zabývá tepelně vodivými termoplastickými materiály. Ukázalo se, že nejlepším řešením je výroba kompozitů s termoplastickou maticí a tepelně vodivým plnivem. Ačkoliv dříve byla nejpoužívanější reaktoplastická matrice, dnes jsou to právě termoplasty, které se dostávají do popředí z důvodu své snadné zpracovatelnosti a možností výroby levnějších a tvarově složitějších kompozitů.

Nejvhodnějším materiálem pro tepelně vodivá plniva je uhlík, jež má výjimečnou tepelnou a elektrickou vodivost. Keramická plniva nedosahují tak vysokých hodnot jako uhlíková nebo kovová, zato slouží jako výborný elektricky izolační materiál pro plošné spoje a elektrické izolátory.

Tepelně vodivé termoplasty jsou nejčastěji zpracovávány vstřikováním, které umožňuje produkovat tvarově přesné výrobky. Jejich nejvhodnější využitím je chlazení stále rychlejších přenosných počítačů nebo vysoce výkonných LED osvětlení. Jedním z cílů této práce bylo i vyzdvihnout výhody tepelně vodivých kompozitů v porovnání s kovy, například jejich nižší cenu, váhu a vyšší flexibilitu.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] Ghoshdastidar, P. S., Heat Transfer, 2nd ed., Oxford University Press, 2012, ISBN 978-0-19-807997-2
- [2] Mráček, A., Ponížil, P., Fyzika II, Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2009 [elektronická skripta] dostupná z http://ufmi.ft.utb.cz/texty/fyzika_2/F2_08.pdf [cit. 28.11.2015]
- [3] Neužil, L., Míka, V., Chemické inženýrství I, VŠCHT, 1998, 464 s., ISBN 80-7080-312-6
- [4] Nožička, J., Sdílení tepla, ČVUT v Praze, Fakulta strojní, 1997, 238 s., ISBN 80-01-00599-8
- [5] Hezlar, R., Sdílení tepla, ČVUT v Praze, Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská, 1999, 186 s.
- [6] Macháčková, A., Kocich, R., Sdílení tepla a proudění, VŠB – Technická univerzita Ostrava, 2012
- [7] Zelová, J., Elektrická a tepelná vodivost uhlíkových polymerních kompozitů, diplomová práce, Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, Fakulta technologická, Zlín, 2012
- [8] Šimek, I., Fyzika polymérov, Slovenská vysoká škola technická v Bratislave, Chemickotechnologická fakulta, 1981, 167 s.
- [9] Campbell, F. C., Structural Composite Materials, ASM International, 2010, ISBN 978-1-61503-037-8
- [10] Zeman, L., Technologie zpracování plastů, Technický týdeník, 2014, s. 47–49
- [12] Osswald, T. A., Menges, G., Material Science of Polymers for Engineers, 3rd ed., Hanser Publishers, 2012, ISBN 978-1-56990-514-2
- [13] Finan, M. J., Thermally Conductive Thermoplastic Materials, ANTEC 1999 Plastics: Bridging the Millenia, Volume 2: Materials, Society of Plastics Engineers, 1999, ISBN 978-1-56676-805-4
- [14] Bareš, R. A., Kompozitní materiály, Praha: SNTL, 1988, 325 s.

- [15] Dad'ourek, K., Kompozitní materiály – druhy a jejich užití, Technická univerzita v Liberci, Fakulta strojní, 2007, 113 s., ISBN 978-80-7372-279-1
- [16] Pavlica, R., Sdílení tepla při výrobě kompozitů, disertační práce, Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, Fakulta technologická, Zlín, 2011
- [17] Biron, M., Thermoplastics and Thermoplastic composites, 2nd ed., Elsevier, 2013, ISBN 978-1-4557-7898-0
- [18] Cheremisinoff, N. P., Materials Selection Deskbook, William Andrew Publishing/Notes, 1996, ISBN 978-0-8155-1823-5
- [19] Jančář, J., Úvod do materiálového inženýrství polymerních kompozitů, Vysoké učení technické v Brně, Fakulta chemická, 2003, 194 s., ISBN 80-214-2443-5
- [20] Ngo, I.-L., Jeon, S., Byon, C., Thermal conductivity of transparent and flexible polymers containing fillers: A literature review, International Journal of Heat and Mass Transfer, 2016, Vol. 98, pp. 219–226
- [21] Kakroodi, A. R., Kazemi, Y., Rodrigue, D., Effect of conductive particles on the mechanical, electrical, and thermal properties of maleated polyethylene, Polymers for Advanced Technologies, 2015, Vol. 26, pp. 362–368
- [22] Noh, Y. J., Kim, S. Y., Synergistic improvement of thermal conductivity in polymer composites filled with pitch based carbon fiber and graphene nanoplatelets, Polymer Testing, 2015, Vol. 45, pp. 132–138
- [23] Vojtěch, D., Kovové materiály, Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, Praha, 2006, ISBN 80-7080-600-1
- [24] Zeman, L., Vstřikování plastů, Praha, Nakladatelství BEN – technická literatura, 2009, 248 s., ISBN 978-80-7300-250-3
- [25] Tavman, I. H., Akinci, H., Transverse Thermal Conductivity of Fiber Reinforced Polymer Composites, Int. Comm. Heat Mass Transfer, 2000, Vol. 27, pp. 253–261
- [26] Mochain, V. N., Gogotsi, Y., Nanodiamond–polymer composites, Diamond and Related Materials, 2015, Vol. 58, pp. 161–171
- [27] Mikula, M., Kompozitní materiály na bázi uhlíkových vláken, bakalářská práce, Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Brno, 2012

- [28] Smalc, M., Shives, G., Chen, G., Guggari, S., Norley, J., Reynolds III, R. A., Thermal performance of natural graphite heat spreaders, Graf Tech International, Interpack 2005-73073, USA, 2005 [online] dostupné z <http://www.graftech.com/wp-content/uploads/2014/12/Thermal-Performance-of-Natural-Graphite-Heat-Spreaders.pdf> [cit. 13. 05. 2016]
- [29] Lebedev, S. M., Gefle, O. S., Evaluation of electric, morphological and thermal properties of thermally conductive polymer composites, Applied Thermal Engineering, 2015, Vol. 91, pp. 875–882
- [29] Throne, J. L., Technology of Thermoforming, Hanser Publishers, 1996, ISBN 978-3-446-40247-8
- [30] Hrabovský, M., Výroba nanostruktur na grafitových/grafenových vrstvách a měření jejich transportních vlastností za pokojové teploty, bakalářská práce, Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Brno, 2012
- [31] Fu, Y.-X., He, Z.-X., Mo, D.-C., Lu, S.-S., Thermal conductivity enhancement of epoxy adhesive using graphene sheets in additives, International Journal of Thermal Sciences, 2014, Vol. 86, pp. 276–283
- [32] nanoCVD [online] dostupné z <http://www.nanocvd.co.uk/> [cit. 13. 05. 2016]
- [33] Cho, E.-C., Huang, J.-H., Li, C.-P., Chang-Jian, C.-W., Lee, K.-C., Hsiao, Y.-S., Huang, J.-H., Graphene-based thermoplastic composites and their application for LED thermal management, Carbon, 2016, Vol. 102, pp. 66–73
- [34] Bhattacharyya, D., Fakirov, S., Synthetic Polymer-Polymer Composites, Hanser Publishers, 2012, ISBN 978-1-56990-510-4
- [35] Lu, W., Dai, L., Carbon Nanotube Supercapacitors, Marulanda, J. M., Carbon Nanotubes, InTech, 2010, ISBN 978-953-307-054-4
- [36] Mazov, I. N., Ilinykh, I. A., Kuznetsov, V. L., Stepashkin, A. A., Ergin, K. S., Muratov, D. S., Tcherdyntsev, V. V., Kuznetsov, D. V., Issi, J. P., Thermal conductivity of polypropylene-based composites with multiwall carbon nanotubes with different diameter and morphology, Journal of Alloys and Compounds, 2014, Vol. 586, pp. 440–442

- [37] Amesöder, S., Ehrenstein, G. W., Properties and Processing of Thermal Conductive Thermoplastics, ANTEC 2004 Plastics: Annual Technical Conference, Volume 3: Special Areas, Society of Plastic Engineers, 2004, ISBN 978-0-9753707-0-4
- [38] Cheewawuttipong, W., Fuoka, D., Tanoue, S., Uematsu, H., Iemoto, Y., Thermal and Mechanical Properties of Polypropylene/Boron Nitride Composites, Energy Procedia, 2013, Vol. 34, pp. 808–817
- [39] Ahn, H. J., Eoh, Y. J., Park, S. D., Kim, E. S., Thermal conductivity of polymer composites with oriented boron nitride, Thermochemica Acta, 2014, Vol. 590, pp. 138–144
- [40] Motáň, F., Lisování uhlíkových kompozitů, bakalářská práce, Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, Zlín, 2014
- [41] Ducháček, V., Polymery – výroba, vlastnosti, zpracování, použití, Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, Praha, 2006, ISBN 80-7080-617-6
- [42] Tasis, D., Carbon Nanotube-Polymer Composites, Royal Society of Chemistry, 2013, ISBN 978-84973-568-1
- [43] Lenfeld, P., Technologie II, Technická univerzita Liberec, Fakulta strojní, 2008 [elektronická skripta] dostupná z http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce_plasty/04.htm [cit. 12. 05. 2016]
- [44] Dvořák, J., Stáhněte si zdarma: Teploměr pro váš procesor s možností logování, Technet, 2010 [online] dostupné z <http://technet.idnes.cz/> [cit. 12. 05. 2016]
- [45] Auto [online] dostupné z <http://www.auto.cz/led-svetla-pro-denni-sviceni-od-helly-12097> [cit. 12. 05. 2016]

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

c_p	Měrná tepelná kapacita při konstantním tlaku [$Jkg^{-1}K^{-1}$]
T_m	Teplota tání [K]
T_g	Teplota skelného přechodu [K]
A	Plocha [m^2]
a	Součinitel teplotní vodivosti [m^2s^{-1}]
A	Pohltivost
BN	Nitrid bóru
l	Tloušťka [m]
LCP	Liquid Crystal Polymer
LED	Light Emitting Diode
P	Příkon [W]
P	Zářivý tok
PA	Polyamid
PAI	Polyamidimid
PAN	Polyakrilonitril
PBT	Polybutylentereftalát
PC	Polykarbonát
PCF	Pitch-based Carbon Fibers
PE	Polyethylen
PE HD	Vysokohustotní polyethylen
PE LD	Nízkohustotní polyethylen
PE LLD	Lineární nízkohustotní polyethylen
PEI	Polyethylenimine

PET	Polyethyltereftalát
PMMA	Polymethylmetakrylát
POM	Polyoxymethylen
PP	Polypropylen
PPO	Polyfenylenoxid
PPS	Polyfenylsulfidová vlákna
PS	Polystyren
PSU	Polysulfon
PTFE	Polytetrafluorethylen
PVC	Polyvinylchlorid
q	Hustota tepelného toku [Wm^{-2}]
R	Odrazivost
t	Teplota [$^{\circ}C$]
T	Propustnost
UV	Ultrafialové záření
∇T	Gradient teploty [Km^{-1}]
α_k	Součinitel přestupu tepla [$Wm^{-2}K^{-1}$]
λ_c	Součinitel tepelné vodivosti kompozitu [$Wm^{-1}K^{-1}$]
λ_p	Součinitel tepelné vodivosti polymerní matrice [$Wm^{-1}K^{-1}$]
λ_f	Součinitel tepelné vodivosti plniva [$Wm^{-1}K^{-1}$]
ϕ	Objemový zlomek plniva
λ	Součinitel tepelné vodivosti [$Wm^{-1}K^{-1}$]
ρ	Hustota [$kg \cdot m^{-3}$]

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 Srovnání amorfnní a semikrystalické struktury polymerů. [9].....	13
Obr. 2 Model ploché desky pro kombinovaný přestup tepla. [13].....	16
Obr. 3 Znázornění synergického efektu v kompozitu. [15].....	18
Obr. 4 Rozdělení kompozitních materiálů podle geometrického tvaru plniva. [23].....	22
Obr. 5 Kubická mřížka diamantu. [27].....	26
Obr. 6 Struktura grafitu. [27].....	27
Obr. 7 Struktura grafenu. [32].....	27
Obr. 8 Uhlíkové nanotrubiice v různých provedeníích. [35].....	28
Obr. 9 Schéma vstřikovacího stroje se šnekovou plastikací. [43].....	33
Obr. 10 Procesor. [44].....	35
Obr. 11 LED osvětlení automobilů. [45].....	36

SEZNAM TABULEK

Tab. 1 Příklady tepelné vodivosti materiálů [10].....	13
Tab. 2 Tepelná vodivost různých plniv [13, 20].....	20