

Studium tepelných vlastností kompozitních materiálů

Jiří Jirásek

Bakalářská práce
2010

 Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav fyziky a mater. inženýrství

akademický rok: 2009/2010

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: Jiří JIRÁSEK

Osobní číslo: T06481

Studijní program: B 2808 Chemie a technologie materiálů

Studijní obor: Chemie a technologie materiálů

Téma práce: Studium tepelných vlastností kompozitních materiálů.

Zásady pro vypracování:

- 1. Řešerše na téma: tepelné vlastnosti materiálů, kompozitní materiály.**
- 2. Experimentální měření a numerické vyhodnocení tepelných vlastností vybraných kompozitních materiálů.**
- 3. Vyhodnocení měřených vlastností s ohledem na složení matrice.**

Rozsah bakalářské práce:

Rozsah příloh:

Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná**

Seznam odborné literatury:

1. Kulhánek F. : Stavební fyzika II. Stavební tepelná technika, ČVUT Praha 2006, ISBN 80-01-03408-9.
2. Jícha M. : Přenos tepla a látky, FSI VUT v Brně 2001, ISBN 80-214-2029-4.
3. Kroisová, D.: "Kompozitní materiály nové generace". In: Vědecká pojednání.
4. VI-1 – Sborník Střediska pro koordinaci výzkumu na vysokých školách v Eoregionu Nisa, Liberec, 2000, ISBN 80-7083-393-9.

Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Dušan Fojtů, Ph.D.

Ústav fyziky a mater. inženýrství

Datum zadání bakalářské práce:

15. února 2010

Termín odevzdání bakalářské práce:

2. června 2010

Ve Zlíně dne 15. února 2010



doc. Ing. Petr Hlaváček, CSc.
děkan



Mgr. Aleš Mráček, Ph.D.
ředitel ústavu

ABSTRAKT

Byly naměřeny závislosti teploty na čase při ochlazování vzorků kompozitních materiálů. Z těchto závislostí byly vyhodnoceny veličiny koeficient tepelné vodivosti a tepelný odpor. Pro měření a vyhodnocení byly vybrány kompozitní materiály na bázi polyesterové lami- nační pryskyřice tereftalátového typu a dicyklopentadienové pryskyřice s nižším obsahem styrenu společnosti Reichhold Ltd. Měření proběhlo na zařízení podle Fitch a byl vyhod- nocen materiál s nejmenším koeficientem tepelné vodivosti a materiál s nejvyšší hodnotou tepelného odporu. Byly vyhodnoceny měřené vlastnosti s ohledem na složení matrice.

Klíčová slova: Tepelná vodivost, tepelný odpor, kompozitní materiály, polyesterová prys- kyřice, dicyklopentadienová pryskyřice

ABSTRACT

Dependencies between temperature and time with cooling of samples of the composite ma- terials were measured. Coefficient of the thermal conductivity and thermal resistance were evaluated from these dependencies. Composite materials based on polyester resin with tereftalon type and dicyclopentadien resin with low styren of Reichhold company were measured and evaluated. Measurements were made on Fitch's instrument and material with the lowest thermal conductivity coefficient and material with highest value of thermal resistance was evaluated. Measured properties were evaluated with respect to composition of matrix.

Keywords: Thermal conductivity, thermal resistance, composite materials, polyester re- sin, dicyclopentadien resin

Poděkování

V první řadě děkuji Ing. Dušanu Fojtů, Ph.D., který se velkou měrou podílel na vzniků této práce. Dále děkuji všem z Ústavu fyziky a materiálového inženýrství za jejich podporu a trpělivost. Děkuji také přátelům a rodině, které vděčím nejen za možnost studovat na Univerzitě Tomáše Bati ve Zlíně.

Příjmení a jméno:

Obor:

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že

- beru na vědomí, že odevzdáním 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 bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému dostupná k nahlédnutí, že jeden výtisk bakalářské práce bude uložen na příslušném ústavu Fakulty technologické UTB ve Zlíně a jeden výtisk bude uložen u vedoucího práce;
- byla jsem seznámena s tím, že na moji 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 – 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 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 bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- beru na vědomí, že pokud je výstupem 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

.....

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 nevydělečně 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 vzdělávacího 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). Odpírá-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 přihlédne k výši výdělku dosaženého školou nebo školským či vzdělávacím zařízením z užití školního díla podle odstavce 1.

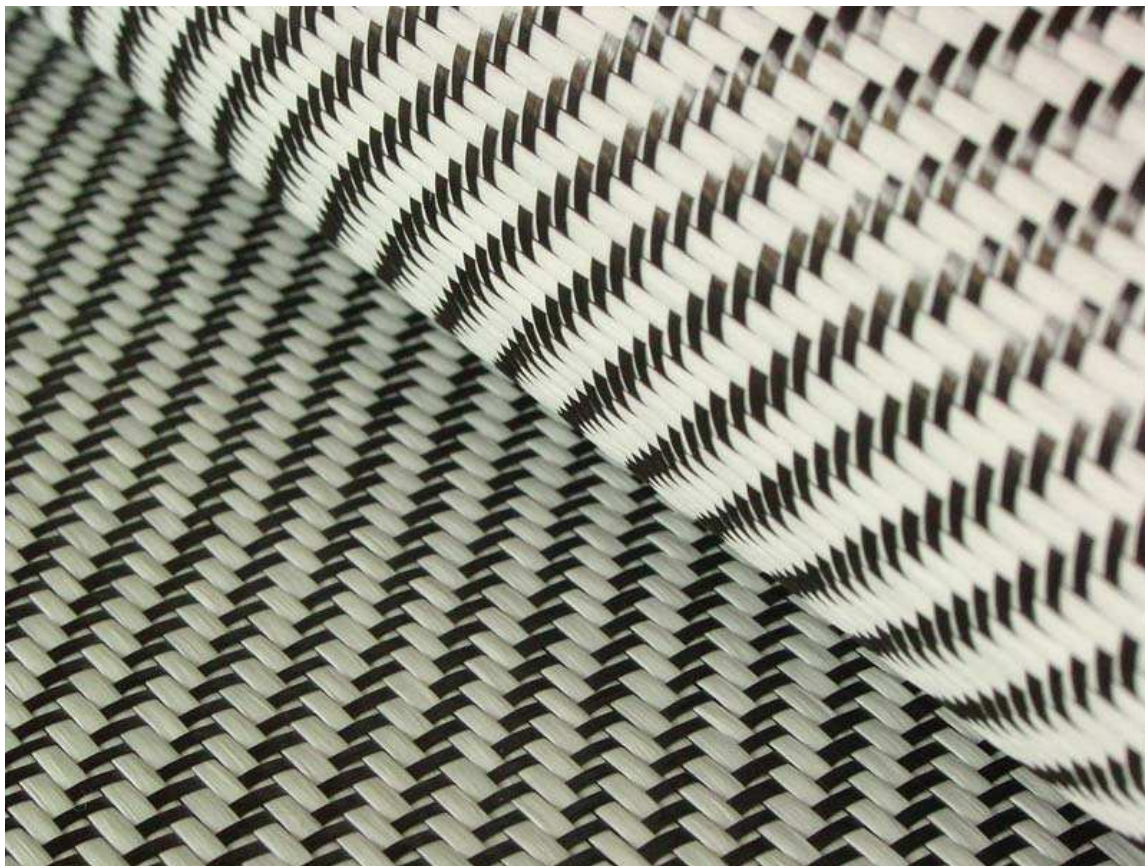
OBSAH

ÚVOD	10
I TEORETICKÁ ČÁST	12
1 KOMPOZITNÍ MATERIÁLY	13
1.1 VÝZTUŽE VLÁKNITÝCH KOMPOZITŮ	13
1.1.1 Přírodní vlákna	14
1.1.2 Skleněná vlákna	14
1.1.2.1 Výroba	15
1.1.3 Uhlíková a grafitová vlákna	15
1.1.3.1 Výroba	16
1.1.4 Plastová vlákna.....	16
1.1.5 Keramická vlákna.....	17
1.1.5.1 Výroba	17
1.1.6 Kovová vlákna	17
1.1.6.1 Výroba	17
1.1.7 Binární vlákna	18
1.1.7.1 Výroba borových vláken.....	18
1.1.8 Whisklery	19
1.2 POVRCHOVÉ ÚPRAVY VÝZTUŽÍ.....	19
1.3 FORMY VÝZTUŽÍ.....	20
1.3.1 Prepreg	20
1.3.2 Roving	21
1.3.3 Vyztužující rohož	21
1.3.4 Tkanina.....	21
1.3.5 Povrchová rohož.....	22
1.3.6 Pletené výztuže.....	22
1.4 MATRICE KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ.....	23
1.4.1 Kovové matrice	23
1.4.2 Keramické matrice	23
1.4.3 Polymerní matrice	24
1.5 NĚKTERÉ POSTUPY VÝROBY KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ S POLYMERNÍ	24
MATRICÍ	24
1.5.1 Ruční kladení	25
1.5.2 Zpracování v autoklávu.....	25
1.5.3 Šroubovicové navíjení.....	26
1.5.4 Pólové navíjení.....	26
1.5.5 Axiální navíjení.....	26
1.5.6 Pultruze	27
1.5.7 Vstřikování	27
1.5.8 Vacuum bag moulding	27
1.5.9 Pressure bag moulding	28
1.6 POUŽITÍ KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ.....	29
1.6.1 Kompozitní materiály v letectví.....	29
1.6.2 Pozemní doprava.....	30
1.6.2.1 Lodní doprava.....	32
1.6.3 Farmaceutické aplikace.....	33

1.6.4	Energetika	35
1.6.5	Sportovní potřeby	37
1.6.6	Armáda	40
1.6.6.1	Maskování	40
1.6.6.2	Pancéřování	41
1.6.6.3	Ochranné pomůcky	41
1.6.7	Stavebnictví	44
1.6.8	Ostatní průmysl	46
1.7	NANOKOMPOZITY	46
2	TEPELNÁ VODIVOST	48
2.1	TEPELNÝ ODPOR	49
2.2	VYHODNOCENÍ MĚŘENÍ TEPELNÉ VODIVOSTI	51
2.2.1	Matematický model měření	51
II	PRAKTICKÁ ČÁST	54
3	MĚŘENÍ TEPELNÉ VODIVOSTI VZORKŮ KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ	55
3.1	CHARAKTERISTIKA A PŘÍPRAVA MĚŘENÝCH VZORKŮ	55
3.2	POPIS MĚŘENÍ	56
3.3	VYHODNOCENÍ TEPELNÉ VODIVOSTI POMOCÍ PROGRAMU NeREG 02	58
3.3.1	Postup vyhodnocení	58
3.3.2	Vzorový příklad výpočtu koeficientu tepelné vodivosti	62
3.4	VÝPOČET TEPELNÉHO ODPORU	63
3.5	VÝSLEDNÉ HODNOTY TEPELNÉ VODIVOSTI A TEPELNÉHO ODPORU VYBRANÝCH KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ	64
	ZÁVĚR	65
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	66
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	70
	SEZNAM OBRÁZKŮ	71
	SEZNAM TABULEK	73

ÚVOD

Kompozitních materiálů je hojně využíváno téměř ve všech oborech průmyslové výroby a výzkumu. Nejedná se pouze o moderní materiály, jako jsou kompozity vyztužené syntetickými vlákny, nebo nanokompozity. Pod pojmem kompozit si většina lidí představí vlákna vyztužené polymerní matrice, ale do této kategorie spadá široké spektrum materiálů. První kompozitní luky využívali již avarští nájezdníci. Takové luky byly vyráběny vrstvením různých druhů dřev, zvířecích šlach a kůží. Jednotlivé vrstvy byly lepeny kožním kličem. Podstatně novějším materiálem spadajícím mezi kompozitní je železobeton. Materiál veřejností možná nedocenený a považovaný spíše za naprosto samozřejmý, ale technologicky naprosto revoluční. A to nejen z hlediska vynikajících vlastností, ale hlavně jednoduchostí zpracování, která umožňuje jeho použití ve stavebnictví. Jen těžko si lze představit stavbu výškových budov z jiného materiálu, který by měl podobné nebo lepší vlastnosti, ale bylo by nutné jej vytvářet za přesně definovaných podmínek a v ochranné atmosféře. Velice moderními kompozitními materiály jsou již zmiňované vláknité materiály s kompozitní matricí. Jejich mechanické vlastnosti mohou být při správném způsobu zpracování velice dobré. Navíc pouhou změnou orientace vláken nebo jejich přidáním je možné významně změnit chování materiálu při zatížení v určitém směru. Výrobek tak může být v některých místech pružný a v jiných velice houževnatý, přestože je vyroben bez spojů, či chemické úpravy některých částí. Jsou také zajímavé také z estetického hlediska. Velice módní je spojení černého, bílého a stříbrného karbonu (materiál z uhlíkových vláken různého typu, které mají mimo jiné odlišnou barvu) a následné broušení. Tím lze dosáhnout efektu podobného damascénské oceli. Takové zpracování je ovšem ojedinělé a jde o zakázkovou výrobu. Častější je spojení těchto vláken v tkanině, které mají i užité vlastnosti. Velké naděje jsou vkládány do nanokompozitních materiálů, které se svými vlastnostmi zásadně liší od ostatních materiálů. Přestože jsou již nanotechnologie dostupné komerčnímu využití, jejich výzkum je teprve na začátku cesty plné nečekaných objevů.

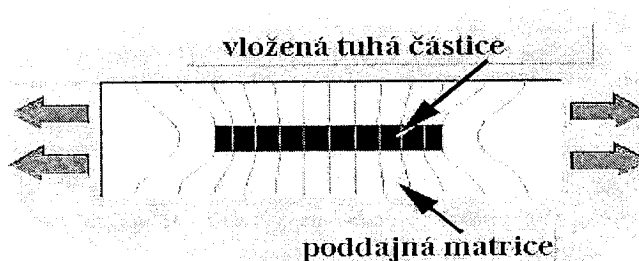


Obr.1. Tkanina z kombinace bílých a černých uhlíkových vláken [1]

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 KOMPOZITNÍ MATERIÁLY

Jedná se o materiály složené ze dvou a více složek tvořících heterogenní materiál, jehož výsledné vlastnosti jsou lepší než součet vlastností samotných materiálů. Podmínka heterogenity vylučuje z kompozitních materiálů například slitiny kovů. Druhou podmínku nesplňují materiály barvené částicemi pigmentu, jež nemají na výsledné vlastnosti téměř žádný vliv. Některé definice vylučují z kompozitních materiálů také materiály s menším obsahem výztuže než 5% a heterogenní materiály, které nevznikly mísením složek (například slitiny kovů, ve kterých během tuhnutí vznikla místa s vyloučenými tvrdšími místy). Pro výrobu kompozitních materiálů je v praxi využíváno spojení výztuže (materiál tuhý a pevný) s matricí (okolní spojitě prostředí výztuže).

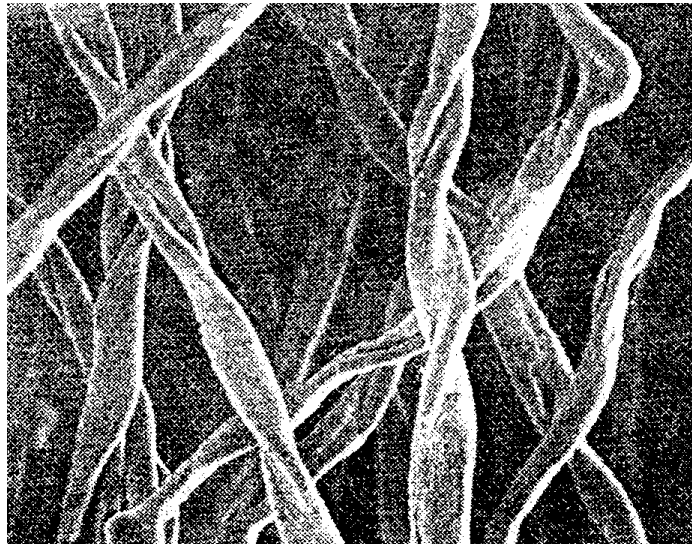


Obr. 2. Deformace části kompozitu tahovým napětím [2]

1.1 Výztuže vláknitých kompozitů

Na výztuže vláknitých kompozitů jsou kladeny velké nároky z hlediska mechanických i chemických vlastností. Pro výrobu kompozitních materiálů je důležité použít výztuž splňující následující podmínky. Taková výztuž musí být dostatečně pevná a mít dobrou adhezi k matrici. Dále musí splňovat podmínky dobré zpracovatelnosti. Nelze použít vlákna s výbornou pevností v tahu, která nejsou dostatečně tepelně a chemicky odolná, nebo není možné je průmyslově zpracovat do požadované podoby, protože nejsou dostatečně ohebná například pro pletení. Vývoj a hledání vhodných materiálů jsou tudíž finančně velice náročné.

1.1.1 Přírodní vlákna



Obr. 3. Bavlněná vlákna 300x zvětšená [2]

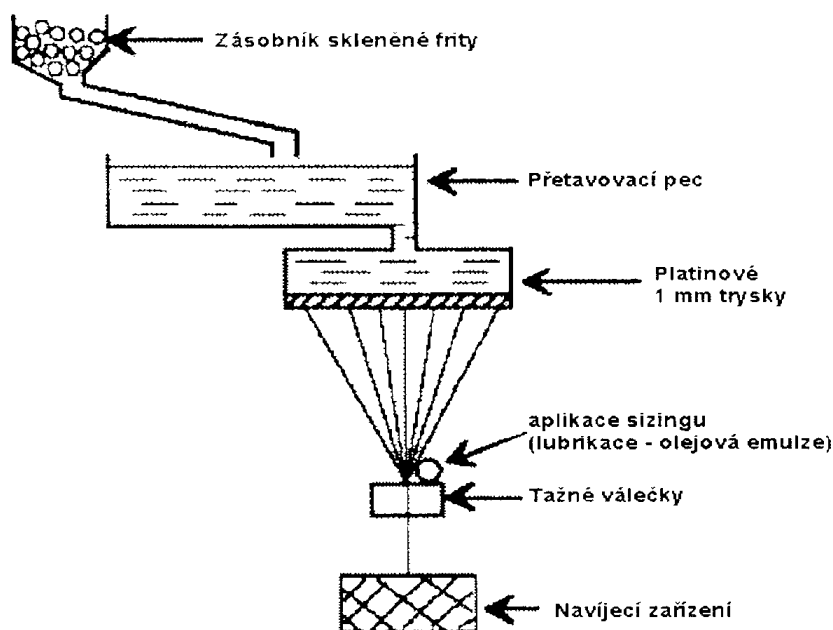
Jsou velice perspektivní formou výztuže z hlediska rostoucím nárokům na ekologickou stránku výroby a jejich možnost uplatnění v rozvojových zemích. Některé mají překvapivě dobré vlastnosti. Například pavoučí vlákna. Základem přírodních vláken bývá celulóza, jako u vláken bavlněných, jutových, konopných, lněných a kokosových, která se dají využít v nekrácené podobě, nebo - jako v případě nanovláken - z důkladně rozmělněného dřeva.

1.1.2 Skleněná vlákna

Používají se především ve spojení s polymerní matricí. S hustotou přibližně $2,5 \text{ g/cm}^3$ jsou těžší než vlákna grafitová nebo polymerní, ale poměr mezi cenou, hmotností a vlastnostmi je předurčuje pro masovou výrobu. Vykazují také nízkou tepelnou roztažnost (méně než polovinu roztažnosti oceli), což je ve spojení s vhodnou matricí výhodné pro výrobu tepelně namáhaných materiálů. Mezi nevýhody patří malá odolnost proti únavě a nízká adheze k matrici. Tu lze zvýšit povrchovou úpravou, která ovšem snižuje pevnost kompozitu.

1.1.2.1 Výroba

Skleněná vlákna jsou vyráběna tažením z taveniny. Při výrobě je nutné vlákna impregnovat, protože jejich vzájemný kontakt poškozuje jejich povrch, na kterém významně závisí výsledné mechanické vlastnosti vlákna. Při hloubce trhliny 1,4 nm klesá pevnost na pouhou třetinu. Pevnost je snižována též degradací vláken vzdušnou vlhkostí. Vzhledem k velkému povrchu vláken vůči objemu je taková degradace velmi rychlá (až 0,25% hmotnosti denně).



Obr. 4. Schéma výroby skleněných vláken [2]

1.1.3 Uhlíková a grafitová vlákna

Vlákna s obsahem 90 – 95 % uhlíku mají oproti skleněným vláknům téměř desetinásobnou tuhost, ale jejich pevnost je nižší. Výhodou je, že byť je nižší, pevnost neklesá až do 1000°C. Jejich poměrně drahá výroba (nejlevnější dvojnásobek, pro speciální aplikace až 100 násobek ceny skleněných vláken) je vykoupena dobrou odolností proti únavě. Jsou však jen málo ohebná a výrobek je poměrně křehký. Hustota je 1,8 – 2 g/cm³, jsou tedy lehčí než vlákna skleněná. Vlákna jsou navíc tepelně odolná. Do 1000 °C nepotřebují zvláštní ochranu, pokud jsou chráněna proti oxidaci, jsou stabilní až do 2000°C. Tato vlákna vykazují jen minimální teplotní roztažnost a za normální teploty jsou chemicky inertní.

Zajímavá je také jejich schopnost vést elektrický proud. Zatímco elektrická vodivost je funkcí obsahu uhlíku, tepelná vodivost je určena i teplotou výroby a uspořádáním krystalů. Tohoto jevu je využíváno při hodnocení kvality vláken. Vyšší obsah uhlíku mají vlákna grafitová, s čímž souvisí jejich lepší elektrická a tepelná vodivost. Uhlíková vlákna jsou sice lehčí a mají lepší adhezi k pryskyřicím, ale nemají takovou pevnost a snáze absorbují vzdušnou vlhkost.

1.1.3.1 Výroba

Uhlíková a grafitová vlákna lze vyrábět několika postupy. V průmyslové výrobě je nejrozšířenější teplotní oxidace organických vláken. Uhlíková a grafitová vlákna mají podobné vlastnosti i strukturu. Liší se obsahem uhlíku (grafitová nad 92%), který je dán mimo jiné teplotou zpracování (uhlíková 800 – 1600 °C, grafitová více než 2200 °C). Samotná výroba probíhá ve třech krocích. V prvním jsou organická vlákna oxidována při teplotě 200 – 400 °C. Další dva kroky již probíhají v inertní atmosféře. Karbonizace je prováděna při teplotě 1000 – 1500 °C a grafitizace též v inertní atmosféře, ale při teplotě převyšující 2200°C.

1.1.4 Plastová vlákna

Polymerní vlákna s nižším obsahem uhlíku. Nemají tak vysokou pevnost jako grafitová vlákna, ale poměr mezi pevností a hustotou, která je pouze 1g/cm³, je lepší. Též poměr tuhost/hustota hovoří pro tato polymerní vlákna. Před překročením pevnosti jsou schopna vysokého prodloužení. Nevýhodou je v některých aplikacích jejich nízká teplotní odolnost (i poměrně odolný kevlar degraduje bez speciální ochrany při 175°C). Škodí jim též UV záření za přítomnosti kyslíku. Jsou ovšem odolná vůči chemikáliím. Přestože nejsou teplotně odolná tak jako grafitová vlákna, jejich lepší ohebnost a nízká teplotní vodivost je předurčuje k výrobě „nehořlavých“ obleků. Nehořlavé obleky bývají navíc vystaveny extrémním teplotám pouze po krátkou dobu, a tak jsou bez problémů schopny ochránit jejich nositele, protože doba po které dochází k degradaci vláken je za této teploty v řádu hodin. Pevnost kevlaru se navíc, na rozdíl od jiných vláken, nemění s délkou. Pro tepelně náročné aplikace vystavené vysokým teplotám je třeba vlákna chránit, nebo používat jejich speciální odnože. Mezi takové teplotně odolné materiály lze zařadit aramid, který krátkodobě odolává teplotám do 2500°C a dlouhodobě 450°C.

1.1.5 Keramická vlána

Jsou vhodná zejména pro materiály vystavené vysokým teplotám. Především proto, že jejich mechanické vlastnosti jsou jen málo závislé na teplotě. Z tohoto důvodu je vhodné jejich použití s matricí, která je též teplotně odolná (kovová, nebo keramická). Oproti skleněným, grafitovým, nebo polymerním vláknům snáší vyšší tlak. Jejich hustota se pohybuje mezi hustotou plastů a kovů. Jejich zpracování je možné ve formě prepregu, ve kterém jsou vlákna vázána polymerem, který je při zalití roztavenou kovovou matricí spálen. Při výrobě materiálu s matricí z hořčíkových a hliníkových slitin je kvůli nízké hustotě (vlákna vyplouvají napovrch taveniny) výhodnější použít vysokotlaké lití, nebo lisování za tepla..

1.1.5.1 Výroba

Keramická vlákna je možno vyrobit vytlačováním vodné suspenze o dostatečné hustotě tryskou, která má často kruhový průřez. Z vytlačených vláken je poté odpařena voda a jsou stabilizována vysokou teplotou (většinou nad 1200°C)

Tato vlákna se většinou nevyužívají ve formě dlouhých vláken, ale ve formě tyčinek.

1.1.6 Kovová vlákna

Jejich výroba je poměrně levná, ale mají vysokou hustotu, což je činí nevhodnými pro výrobu lehkých kompozitů. Hojně využívána jsou například ve stavebnictví pro zpevnění betonu nebo hliníkových slitin. Je možné je použít také spolu s polymerní matricí. Pro vztužení tepelně odolných materiálů se využívá wolframových vláken. Perspektivním se zdá být využití vláken z kovových skel. Cena kovových vláken je velice rozličná. Ocelová vlákna jsou levná a vhodná pro masové aplikace, jako již zmíněný zpevněný beton, zatímco beryliová vlákna jsou extrémně drahá.

1.1.6.1 Výroba

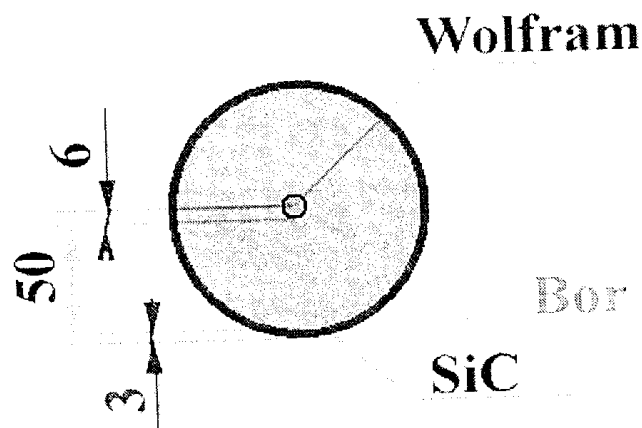
Běžná kovová vlákna je možné vyrobit tažením kovového prutu, elektrochemicky a dalšími postupy. Výroba vláken z kovových skel je analogií k výrobě skleněných vláken, ale chlazení je mnohonásobně rychlejší. To je důležité, protože jinak by docházelo ke krystalizaci kovu.

1.1.7 Binární vlákna

Binární vlákna jsou vlákna složená ze dvou fází. Jednou je nosič (většinou tenký drát) a druhou samotné vlákno. Tato vlákna nejsou sama kompozitním materiálem, protože tenký nosič nemá zásadní vliv na mechanické vlastnosti celého vlákna. Mezi taková vlákna patří některá vlákna keramická a vlákna borová. Borová vlákna jsou velice pevná, a přestože obsahují wolframové jádro o vysoké hustotě, i lehká. Kvůli vysoké ceně jsou používána především jako výztuž jiných kompozitních materiálů, například ve spojení se skelným nebo grafitovým vláknem. Takových materiálů je využíváno v letectví a kosmickém výzkumu. Pro použití vláken v tepelně namáhaných částech letadel a raketoplánů je nutné chránit je vrstvou SiC, protože bez ochrany jsou stálá pouze do teploty 500°C. Takto chráněná vlákna jsou stálá až do teploty 700°C. Jejich výroba „napařováním“ boru na wolframové jádro a nutnost ochrany vrstvou karborunda je příliš komplikovaná pro jejich masové využití.

1.1.7.1 Výroba borových vláken

Tenký (12,5 μm) wolframový drát je nahřán na teplotu 1100°C a na něj jsou naneseny páry boru vzniklé reakcí chloridu boritého a vodíku. Tyto páry na wolframovém povrchu tvoří krystaly o velikosti 2 – 3 nm.



Obr. 5. Řez borovým vláknem [2]

1.1.8 Whisklery

Jedná se o tenké krystaly (průměr 1 mikrometr a délka 3 – 4 mm), které obsahují jednu šroubovou dislokaci, která není při běžných zatíženích schopna kluzu. To je odlišuje od monokrystalických vláken, která mají více dislokací schopných kluzu. Pevnost whisklerů se blíží jejich teoretické pevnosti. Po jejím překročení se začnou objevovat volné dislokace a whiskler se chová jako monokrystalické vlákno. Do té doby se deformuje pouze pružně. Jejich výroba je značně komplikovaná. Krystaly lze získat například kondenzací par některých látek ve vakuu. Tyto krystaly se v těle nerozkládají a mohou způsobovat například rakovinu plic.

1.2 Povrchové úpravy výztuží.

Většinou je třeba povrch chránit a upravovat jeho vlastnosti. To je dáno nestabilitou některých vláken na vzdušném prostředí, požadavkem na zlepšení teplotní odolnosti a základní vlastností kompozitu, kterou je přenos napětí matrice na vlákno. K tomu je zapotřebí dobrá adheze vlákna na matrici. Zatímco ochrana proti vnějším vlivům není někdy zapotřebí (vlákna jsou odolná vůči běžným podmínkám a po zalití do matrice jsou chráněna proti oxidaci nebo mechanickému poškození), dobrá adheze je zásadní pro výrobu kvalitních kompozitů kvůli již zmíněnému přenosu napětí na vlákno, ale i ochraně vláken. Pokud by nebyla přilnavost dokonalá, mohly by do materiálu difundovat látky z prostředí a vlákna ničit. Zamezením přístupu kyslíku se navíc zvýší jejich teplotní odolnost. V ideálním případě je rozhraní vlákno – matrice pouze dvoudimenzionální a neobsahuje tedy žádnou mezivrstvu, která by nabývala mechanických vlastností. Ve většině případů tomu tak však není. Mezivrstvy můžeme dělit podle jejich vzniku na neřízené a řízené.

Prvně jmenované vznikají při výrobě kompozitů. Jsou jimi například mezivrstvy vzniklé sorpcí tvrdidel na povrchu vláken a tím vyvolaná změna vytvrzovacího procesu, případně změna orientace krystalických domén vzniklých při tunutí termoplastické matrice v přítomnosti vláken.

Za řízené mezivrstvy označujeme třídimenzionální rozhraní v kompozitech, která vznikla řízeným procesem výroby. Mají tudíž definovanou strukturu a vlastnosti. Takto se upravují vlákna chemicky nebo také plazmatem.

Chování mezivrstev je velice těžce předvídatelné hlavně u neřízených mezivrstev. Nejlépe jsou zpracovány metody měření jejich vlastností na povrchu vláken skleněných a grafito-

vých. Ovšem ani zde nelze říci, že jsou měření přesná. Výsledky získané různými metodami se liší i o několik řádů.

1.3 Formy výztuží

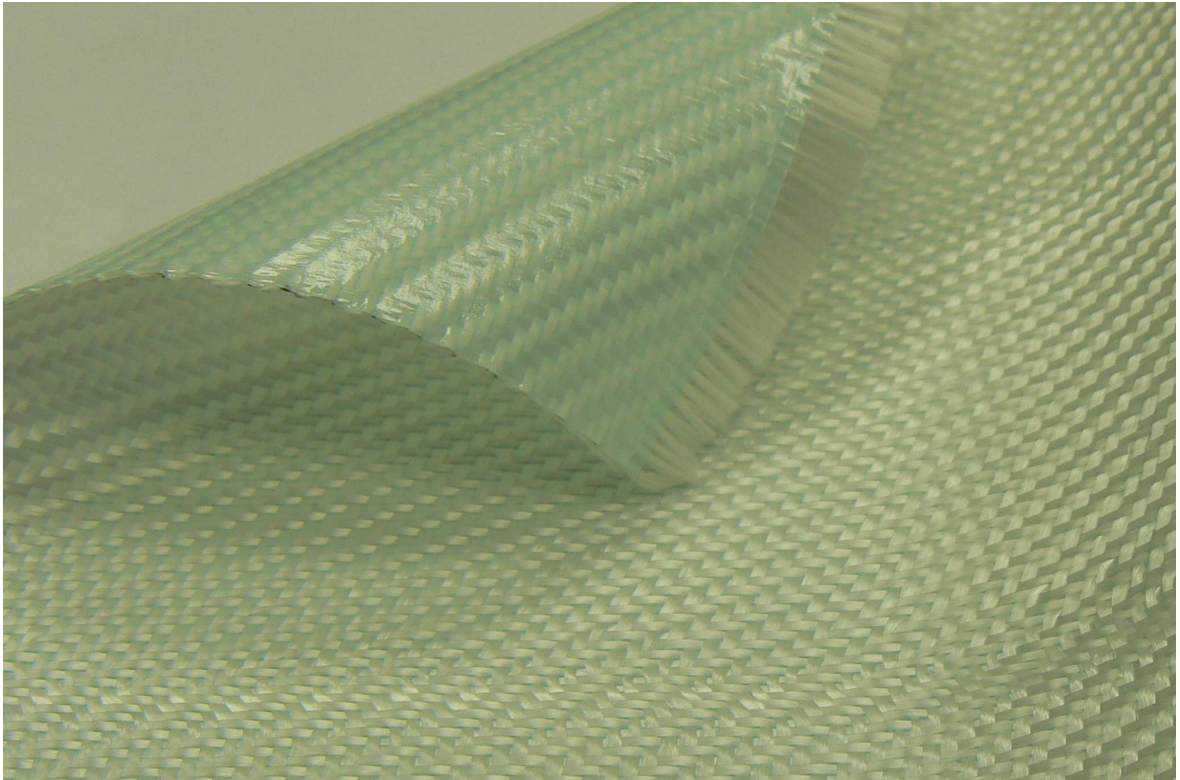
Výztuže vláknitých kompozitů jsou nejčastěji (kromě whisklerů) dodávány ve formě pramenců navinutých na cívce (rovigů). Ty jsou dále zpracovány do formy určené ke konečnému zpracování. Orientace a délka vláken mají zásadní vliv na vlastnosti hotového výrobku, proto si parametry určuje výrobce pro konkrétní výrobek sám. Důležitý je také obsah vláken, který je udáván v g/m^2 v . Typy výztuží lze začlenit do několika kategorií.



Obr. 6. Řezání prepregu plotrem [3]

1.3.1 Prepreg

Většina zpracovatelů používá k výrobě vlákna ve formě prepregu. Prepreg je polotovar složený z rovigů, které pojí částečně vytvrzená pryskyřice. Výhodou je, že vlákna drží tvar a přilnou k formě. Tím je jejich zpracování výrazně ulehčeno.



Obr. 7. Prepreg skelých vláken [4]

1.3.2 Roving

Jedná se o pramenec nekonečných vláken navinutých na cívku. Většina rovingů obsahuje 12 – 120 vláken. Rovingy jsou určeny buď pro zpracování do jiných forem výztuží, nebo přímo pro výrobu kompozitů.

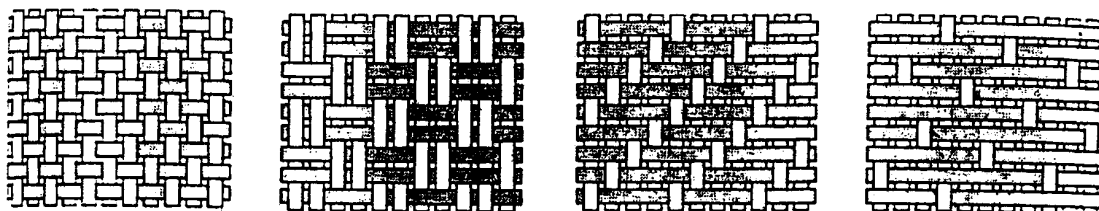
1.3.3 Vytuzující rohož

Rohož je vyráběna z dlouhých či krácených rovingů, které jsou naimpregnovány organickým pojivem (pryskyřice, termoplast), jehož obsah je 5 – 30% hmotnosti, a slisovány za zvýšené teploty. Náhodná orientace vláken vede ke zvýšení obsahu pryskyřice, což má za následek snížení pevnosti a tuhosti. Výhodou jsou ovšem kvaziizotropní vlastnosti (Z makrohlediska má výrobek izotropní vlastnosti).

1.3.4 Tkanina

Tkaná výztuž je analogií běžných textilií za použití speciálních vláken. Takováto výztuž má v kompozitu vysoký podíl vláken. Ten má tedy vysokou tuhost a pevnost. Vlastnosti

výztuže jsou dány nejen materiálem, ale i orientací vláken a jejich vzájemným vázáním. Výrobek tak může vykazovat vysokou tuhost v jenom směru, ale ohebnost v jiném. Příkladem může být kompozitní rám bicyklu, který je ve směru akcelerace velice tuhý, ale ve směru zatížení jezdce pruží, což přispívá ke komfortu jízdy. Projektovat takovýto výrobek je velice obtížné a drahé.



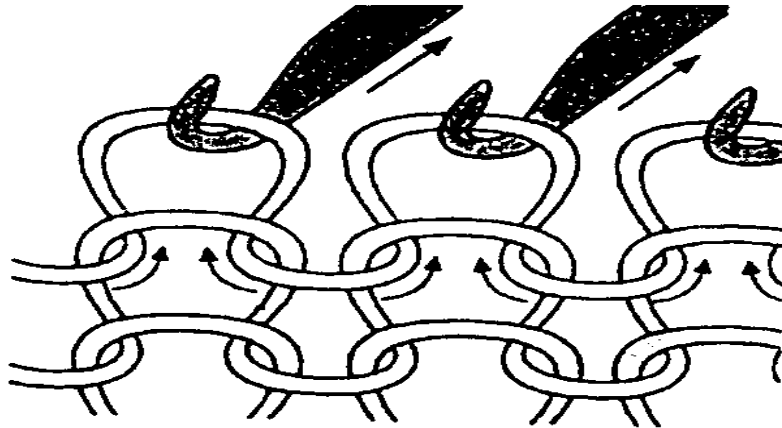
Obr. 8. Základní typy tkanin používaných jako výztuže [5]

1.3.5 Povrchová rohož

Povrchové rohože mají jemnou strukturu a malou plošnou hmotnost. Vyrábí se většinou z polyesterových vláken a na mechanické vlastnosti mají minimální vliv. Jejich účelem je ochrana křehkého kompozitu před mechanickým poškozením, před vlivem UV záření, povětrnostních vlivů a také estetická úprava materiálu.

1.3.6 Pletené výztuže

Pletení vláknitých výztuží umožňuje výrobu komplikovaných dvou i třírozměrných útvarů. Lze ovšem použít pouze velice ohebná vlákna, protože při pletení ok dochází k jejich deformaci. Rizikem použití pletených výztuží je možnost křehkého lomu materiálu v oblasti s přebytkem pryskyřice. V pletených výztužích je navíc pouze malá část vláken orientována ve směru předpokládaného namáhání. Důsledkem je poměrně snadná deformace ve všech směrech. 3D předtvary je možné vyrábět technologií splétání známou jako braiding.. Takto pletené výztuže mají navíc vyšší gramáž a méně míst s kumulovanou maticí.



Obr. 9. Pletená výztuž [5]

1.4 Matrice kompozitních materiálů

Matricí je složka kompozitu, která tvoří spojitě prostředí výztuže. U vláknitých kompozitů dává výrobku tvar a chrání jej před vlivy okolí. Matrice mají menší pevnost, než vlákna. Pokud by tomu tak nebylo, nesplňoval by materiál podmínku kompozitu, kterou je zlepšení vlastností obou složek. Napětí přenášené na vlákna by je porušilo při nižším zatížení, než je kritické pro matici bez výztuže. Matrice bývají kovové, polymerní a keramické. Volba matrice je velice důležitá pro výsledné vlastnosti materiálu. Například tepelně odolná vlákna v matrici s nízkou teplotou tání nemohou zaručit odolnost materiálu vysokým teplotám.

1.4.1 Kovové matrice

Kovové matrice mají vyšší hustotu než matrice polymerní, ale nebývají náchylné ke křehkému lomu a mají (kromě speciálních polymerů) vyšší teplotu tání. Velice významnými kovovými maticemi jsou slitiny hliníku (dural), hořčíku a titanu. Jedny z tepelně nejodolnějších jsou matrice ze slitin niklu.

1.4.2 Keramické matrice

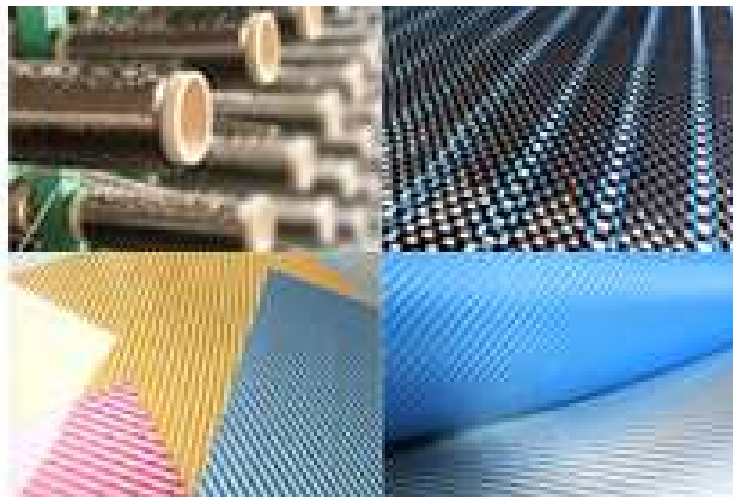
Keramické matrice vynikají výbornou tepelnou odolností. Ta je významná v kosmických aplikacích. Velice důležitá je jejich malá tepelná roztažnost a malá ztráta mechanických vlastností do teploty přes 1000 °C, kdy se pevnost v tahu pohybuje kolem 800 Mpa. Jsou také velice tvrdé, ale křehké. Klasické zpracování keramiky probíhá za vysoké teploty, což není vhodné pro použití ve spojení s vlákny, která nejsou dostatečně tepelně odolná. Pro takové aplikace se využívá odlišná metoda. Výztuž je prosycována parami chemických látek, které se usazují na povrchu vláken a chemickou reakcí se vytváří keramická matrice.

Tuto metodu je nutno několikrát opakovat, aby se zaplnily póry, které při růstu první vrstvy vznikají. Při výrobě kompozitu s výztuží, která snese vysoké teploty (většinou taktéž keramická) je běžně používána prášková metoda. Matrice ve formě prášku je spolu s vlákny lisována za vysoké teploty. Touto metodou se dají vytvářet poměrně komplikované 3D tvary.

1.4.3 Polymerní matrice

Polymerní matrice nemají tepelnou odolnost matric keramických nebo kovových, ale jsou lehké a je možno je zpracovávat do velice komplikovaných tvarů. Výrobních postupů kompozitních materiálů s polymerní matricí je nepřehledné množství a řada výrobců používá vlastní metody vhodné pro konkrétní aplikace. Zpracování a použití vláknitých kompozitů s polymerní matricí na bázi pryskyřice je věnována z následujících kapitol. Tyto materiály lze navíc spojovat lepením, lisováním nebo mechanicky.

1.5 Některé postupy výroby kompozitních materiálů s polymerní matricí

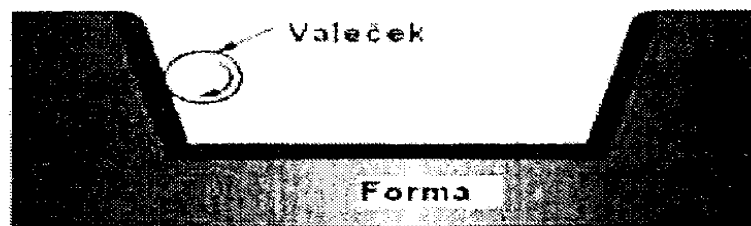


Obr. 10. Roviny a prepregy [6]

Jelikož jsou polymerní matrice před vytvrzením tekuté je nutné použít pro výrobu formu. Ta může být otevřená, nebo uzavřená. Otevřená forma umožňuje odpaření rozpouštědel pryskyřice a poskytuje oporu jen z jedné strany materiálu. Formu je nutno chránit, aby k ní materiál nepřilnul a šel vyjmout, proto se mezi formu a materiál nanáší vrstva separátoru, nebo neporézní fólie.

1.5.1 Ruční kladení

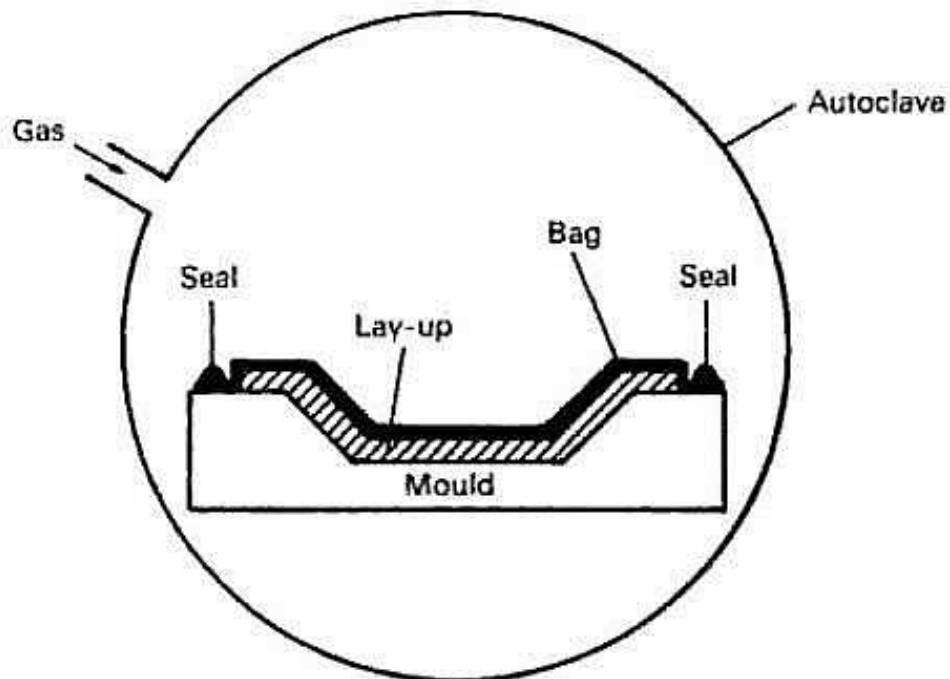
Na formu se ručně kladou vlákna nejčastěji ve formě pletené nebo tkané rohože. Ta se poté prosyťí pryskyřicí a vytvrdí. Tvrzení probíhá za pokojové teploty nebo za zvýšené teploty, u většiny pryskyřic okolo 80 °C. Tato výroba je výhodná pro malé série a rozměrné díly.



Obr. 11. Forma pro ruční výrobu kompozitu [2]

1.5.2 Zpracování v autoklávu

Na otevřenou formu jsou ručně nebo strojově nanášena vlákna (holá, nebo ve formě prepregu) a tekutá matrice. Na surový materiál je dále kladena odtrhová fólie, rohož z polymerních vláken umožňující odtok přebytečné pryskyřice. Vše je hermeticky uzavřeno fólií s vrstvou skelného textilu umožňujícího odsátí vzduchu. Po odsátí vzduchu a přebytečné pryskyřice dochází k vytvrzování za zvýšené teploty (ta dosahuje 120 – 200 °C). Při výrobě tlustostěnných materiálů je nutné hlídat vnitřní teplotu, která může stoupat následkem vytvrzovací exotermní reakce, což vede k degradaci materiálu a tvorbě pórů. Podtlak přitlačuje vrstvy prepregu a zajišťuje odvod přebytečné pryskyřice. Po vytvrzení je nutné chladit výrobek pomalu kvůli vnitřnímu pnutí uvnitř materiálu, vzniklému tepelnou roztažností různě orientovaných vláken.



Obr. 12. Schéma zpracování v autoklávu [7]

1.5.3 Šroubovicové navíjení

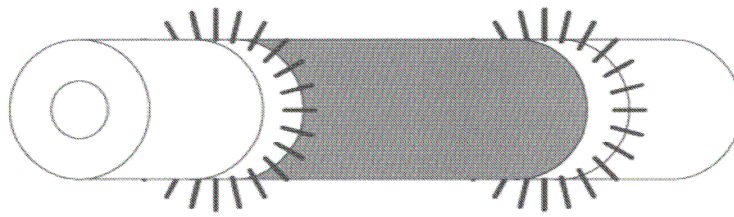
Na trnovou formu se navíjí vlákna ve formě rovingu smočeného v pryskyřici. Smočení se provádí vinutím po povrchu válce vlhčeného pryskyřicí. Přebytečná pryskyřice se poté odstraní ofukovací tryskou. Po vytvrzení v peci je forma buď vyjmuta, nebo pokud to vyžaduje použití (vysokotlaké nádoby, ve kterých vložka zajišťuje těsnost), zůstane uvnitř výrobku. Vyjmutí formy se provádí vytlačáním, nebo u velkých výrobků (těla větrných elektráren) sklopením segmentů formy a jejím vyjmutím.

1.5.4 Pólové navíjení

Pólové navíjení umožňuje pohyblivými rameny na otáčivou formu navíjet vlákna i v oblasti pólů, narozdíl od šroubovicového navíjení, kde se forma musí uzavřít pomocí čepců vyrobených zvlášť. Z takovýchto výrobků ovšem nelze vyjmout formu.

1.5.5 Axiální navíjení

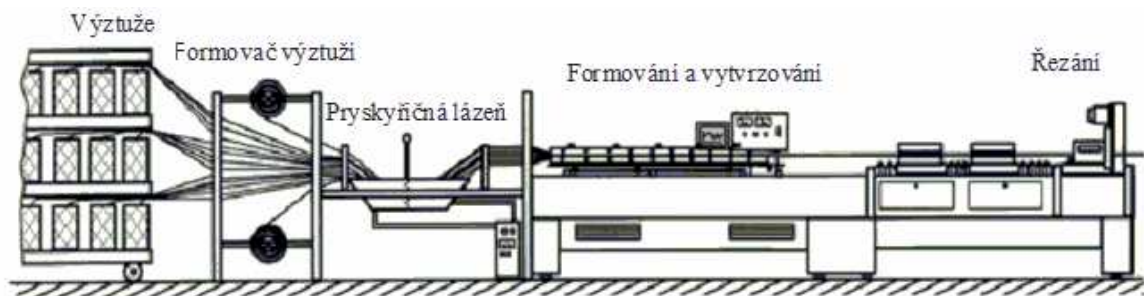
Pro produkty zatěžované ve směru osy výrobku je výhodné kladení vláken v téže směru, nebo ve směru téměř axiálním. To umožňuje navíjení pohyblivými rameny, která vlákna zachytávají za výběžky na vrcholech formy.



Obr. 13. Forma pro axiální navíjení vláken [8]

1.5.6 Pultruze

Při pultruze jsou vlákna kontinuálně tažena a kladena na formu, kde dochází k vytvrzení za zvýšené teploty. Ohřev grafitových vláken je prováděn indukčně a skelných vláken mikrovlnně.



Obr. 14. Schéma výroby pultruzí [9]

1.5.7 Vstřikování

Vstřikováním jsou vyráběny díly, které vyžadují zpevnění termoplastického materiálu a není nutné pro ně projektovat náročné výztuže z dlouhých vláken. Principem je vstříknutí krátkých vyztužujících vláken a termoplastu do formy. Po vychladnutí je vyjmut hotový díl. Analogicky se dají vyrábět vstřikované kompozity s chemicky vytvrzenou matricí. Zde samozřejmě není vstřikovací píst zahříván. Samotné vstřikování je prováděno automatickým vstřikovacím strojem.

1.5.8 Vacuum bag moulding

Při výrobě kompozitních dílů metodou vacuum bag moulding je na hladkou formu nanese- no vlákno a vstřikováním nasyceno prskyřicí. Přítlaku na tkaninu je docíleno odsátím

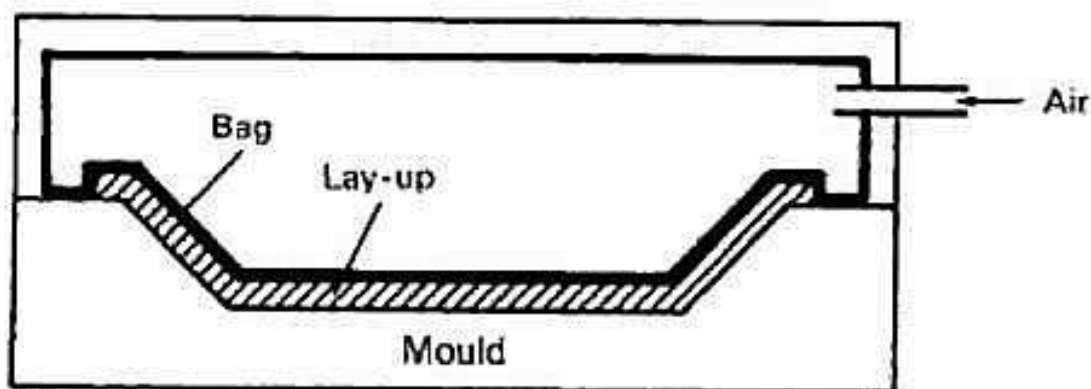
vzduchu pod pryžovým vakem, který je vrchní vrstvou. Na tkaninu tedy působí atmosférický tlak.



Obr. 15. Výroba kajaku technologií Vacuum bag moulding [10]

1.5.9 Pressure bag moulding

Na negativní formu je nanesen prepreg a jako vnitřní částí je použit pružný vak. V něm je vytvářen tlak, který působí na prepreg a tlačí jej do formy. Výhodou této technologie je oproti Vacuum bag moulding vyšší tlak, který působí na materiál a hladký vnitřní povrch výrobku.



Obr. 16. Schéma zpracování trubky metodou Pressure bag moulding [11]

1.6 Použití kompozitních materiálů

Kompozitní materiály si pro svoje výborné mechanické vlastnosti našly uplatnění snad ve všech oborech výroby a výzkumu. Jejich nízká hmotnost je obzvláště vhodná pro konstrukci draků lodí a letadel. Jejich extrémní pevnost a schopnost pohltit vibrace jsou využívány při výrobě stožárů větrných elektráren. Ovšem není nutné omezovat se na výrobky značných rozměrů. Pomalu si cestu ke spotřebiteli nacházejí i nanokompozity. Většinou se zatím jedná o rozměrnější výrobky obsahující nanočástice, ale menší částice výztuže umožňují výrobu miniaturních kompozitních součástek elektroniky, farmaceutických aplikací a jistě mnoho dalších neprobádaných možností.

1.6.1 Kompozitní materiály v letectví

Použití kompozitních materiálů přináší výraznou úsporu hmotnosti a tím i paliva. Tyto materiály jsou navíc odolné vůči „únavě“. Nevýhodou může být cena, kterou nevyváží ani již zmíněná úspora paliv. Úspora hmotnosti totiž není přímo úměrná obsahu kompozitu, ale postupně klesá. Nahrazování vyššího podílu klasických materiálů kompozity je velice náročné na vývoj. Pro finančně vyváženou výrobu je proto nutné najít vhodný podíl kompozitů v konstrukci.

Nové kompozitní materiály jsou velice vhodné pro stavbu vojenských letadel pro jejich schopnost částečně pohltit záření radarů. Takový letoun je hůře odhalitelný.

Z důvodů uvedených výše je použití kompozitních materiálů vhodné i pro výrobu vrtulníků. Firma Boeing používá kompozitů s polymerní a kovovou maticí i pro výrobu listů rotoru.



Obr. 17. Celokompozitní trub dopravního letadla [3]

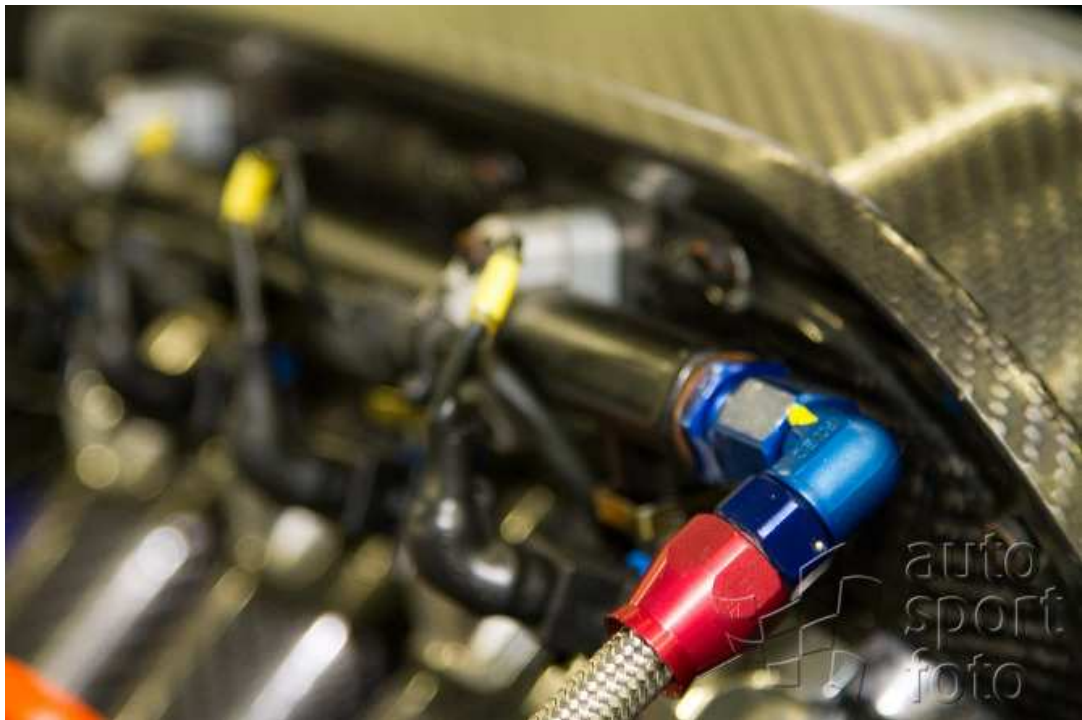
1.6.2 Pozemní doprava

Automobilový průmysl

Kompozitní materiály již nejsou v automobilech nikterak výjimečné. Běžné je jejich použití v reflektorech, přítláčných křídlech, difusorech a částech pohonného ústrojí. Kompozitních materiálů s keramickou maticí využívají někteří automobiloví výrobci v odvodech výfukových plynů. Již v roce 2005 činil podíl kompozitních materiálů průměrně 37,2 kg hmotnosti automobilu. Ve sportovních a závodních automobilech je podíl kompozitních materiálů velmi vysoký.



Obr. 18. Motor Škody Fabie S 2000 s karbonovým krytem [12]



Obr. 19. Detail motoru Škody Fabie S 2000 [13]



Obr. 20. Supersportovní automobil Koenigsegg ccx s karoserií z uhlíkových vláken [14]

1.6.2.1 Lodní doprava

Kompozitních materiálů je hojně využíváno pro stavbu kýlů lodí. Většinou se jedná o lodě sportovní, jachty a samozřejmě moderní armádní plavidla. Kompozitní materiály s polymerní matricí mají oproti kovovým materiálům výhodu vysoké odolnosti proti vodě. Jsou navíc lehčí, což přináší úsporu paliva. Ta vyplývá nejen ze samotné úspory hmotnosti, ale i z nižšího ponoru. Ponořená část klade větší odpor a loď brzdí.



Obr. 21. Letadlová loď US Army s kompozitním pláštěm pro snížení intenzity odražených radarových vln [15]



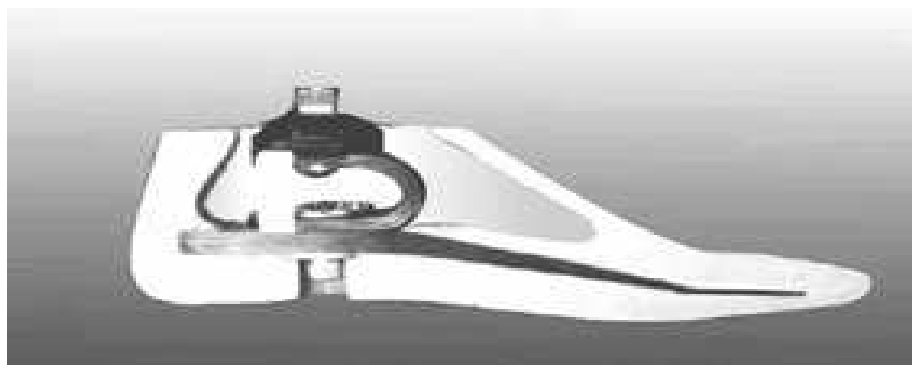
Obr. 22. Nástřik kompozitu na formu pro výrobu jachet [16]

1.6.3 Farmaceutické aplikace

Ve farmacii je kompozitních materiálů využíváno k výrobě protéz. Zatímco použití kompozitů v zubních náhradách má hlavně estetické výhody (Kompozit má strukturovaný povrch a tím přirozenější vzhled než klasická náhrada bez povrchových anomálií), v endoprotetice jsou důležité jejich mechanické vlastnosti a nízká hmotnost.



Obr. 23. Protéza z uhlíkových vláken [17]



Obr. 24. Detail protézy, ve které je tlumící prvek z uhlíkových vláken [17]

Některé kloubní náhrady jsou též vyrobeny z kompozitních materiálů.

Dlouhodobé příznivé výsledky cementovaných dříků závisí obecně na metalurgii dříku, jeho tvaru a povrchu, na přípravě kostního lůžka a na cementovací technice. Z dnešního pohledu lze zařadit dřík Poldi-Čech mezi dříky označované jako tzv. kompozitní nosník. Tento typ může být přímý nebo anatomický. Má lepší počáteční stabilitu než dřík typu zátěžového kužele. Může být opatřen límcem. Dlouhodobá praxe ukázala, že může být u nich tenký i silný cementový plášť. Dnes už víme, že i když dochází k bodům těsného kontaktu dřík - kortikalis, nezhoršuje to stabilitu a u vysokoleštěných povrchů nedochází k osteolýze z otěrových částic. Kompozitním nosníkům vyhovuje hladký nebo leštěný povrch. Z tohoto pohledu dřík Poldi-Čech splňuje principy moderních a úspěšných dříků typu kompozitní nosník. [36]

Kompozitní materiály jsou také využívány pro náhradu cév a jiných orgánů .



Obr. 25. Kompozitní umělá céva [18]



Obr. 26. Kompozitní dříví kloubní náhrady [19]

1.6.4 Energetika

Významná část odbytu kompozitních materiálů připadá na výrobu stožárů větrných elektráren a listů jejich rotorů. Některé nevodivé kompozity jsou vhodné pro výrobu izolací. Při stavbách elektrárenských zařízení je také kompozitů používáno na výrobu ochozů. Takový ochoz dosahuje pevnosti kovového, ale snižuje riziko úrazu elektrickým proudem, protože obsluha není „uzeměna“.



Obr. 27. Vodič v kompozitním izolantu a další kompozitní izolanty [20]



Obr. 28. Rošty, poklopy a žebříky z nevodivého kompozitu [21]



Obr. 29. Kompozitní izolant vysokého vedení [22]

1.6.5 Sportovní potřeby

Pro výrobu sportovního náčiní je kompozitních materiálů využíváno velice hojně. Je téměř nemožné najít sportovní odvětví, ve kterém žádný výrobce nenabízí kompozitní výrobky.

Výroba sportovních potřeb z kompozitních materiálů je velice komplikovaná, ale vývoj jde rychle kupředu, protože se v tomto odvětví pohybuje významná část světového kapitálu. Výrobci sportovních potřeb neváhají vynaložit astronomické částky na vývoj a výrobu nových materiálů. Vyžadují to především složité 3D tvary, ze kterých není možné vyjmout standardní formu, nebo je nutné materiály spojovat. Takto je vyráběna řada sportovního náčiní. Například při výrobě vysokotlakou metodou jsou vlákna nasycena pryskyřicí a vložena do vnější formy. Tlakem horkého vzduchu je surový materiál vtačen do stěn formy a vytvrzen. Výhodou je též nízká hmotnost výrobku (úspora 20 % oproti stejně pevnému výrobku vyrobeného klasickou metodou) a možnost vyrábět komplikované tvary. Nevýhodou je vznik míst s chaotickým uspořádáním vláken v záhybech. Plzeňský výrobce jízdních kol Duratec založil na podobném principu výrobu ráků. Ty vyrábí z kombinace duralových a kompozitních dílů. Kompozitní díly jsou vtačovány nikoliv do vnější formy, ale do duralové části ráku s otvorem, který slouží jako západka. Duratec také vyvinul technologii kladení vláken do formy, při které nedochází ke změně orientace vláken v místech ohybů a vyrábí tak monocoque ráky nejlepších vlastností na světě. Tuto skutečnost potvrzují nejen testy, ale i snaha renomovaných výrobců o převzetí technologických postupů. Touto technologií je též možno přizpůsobit geometrii ráku potřebám každého zákazníka, což u monocoque ráků také nikdo jiný nenabízí. Důvodem je, že pro výrobu klasickou technologií je nutno i při nepatrné změně v konstrukci použít jinou formu.



Obr. 30. Rám Duratec vyrobený technologií mechanického spojování kompozitu s durallem [23]



Obr. 31. Monocoque řídítka silničního kola [24]



Obr. 32. Část rámu silničního kola vyrobeného technologií monocoque [25]

1.6.6 Armáda

Rozpočet největších světových armád je mnohem vyšší než rozpočty soukromých firem. Z toho plyne, že podstatná část výzkumu se odehrává v této oblasti. Vývoj kompozitních materiálů není výjimkou.

1.6.6.1 Maskování

Kompozity mají kromě výborných mechanických vlastností další, pro armádu důležitou vlastnost, kterou je pohltivost radarových vln. Spolu s vhodným tvarem povrchu lze snížit množství odražených vln pod mez rozpoznatelnosti radarem (technologie stealth). Této technologii využívá americké letectvo v konstrukci letadel a švédská armáda v konstrukci lodí.



Obr. 33. Stíhací letoun stealth F117 US Army s kompozitním pláštěm [26]



Obr. 34. Regata švédské armády s technologií stealth [27]

1.6.6.2 Pancéřování

Mechanická odolnost kompozitních materiálů je důležitá pro použití i u takových materiálů jako jsou pancíře. Pro pancéřování je již dlouho používáno keramických a kovových kompozitů. Nyní je zaváděno pancéřování, které obsahuje kompozit s uhlíkovým vláknem a polymerní matricí. Je-li tato vrstva vrchní, stěžuje také odhalení bojových vozidel. Pokud je vláknitého kompozitu použito jako vnitřní vrstvy, plní pouze funkci ochrannou.

1.6.6.3 Ochranné pomůcky

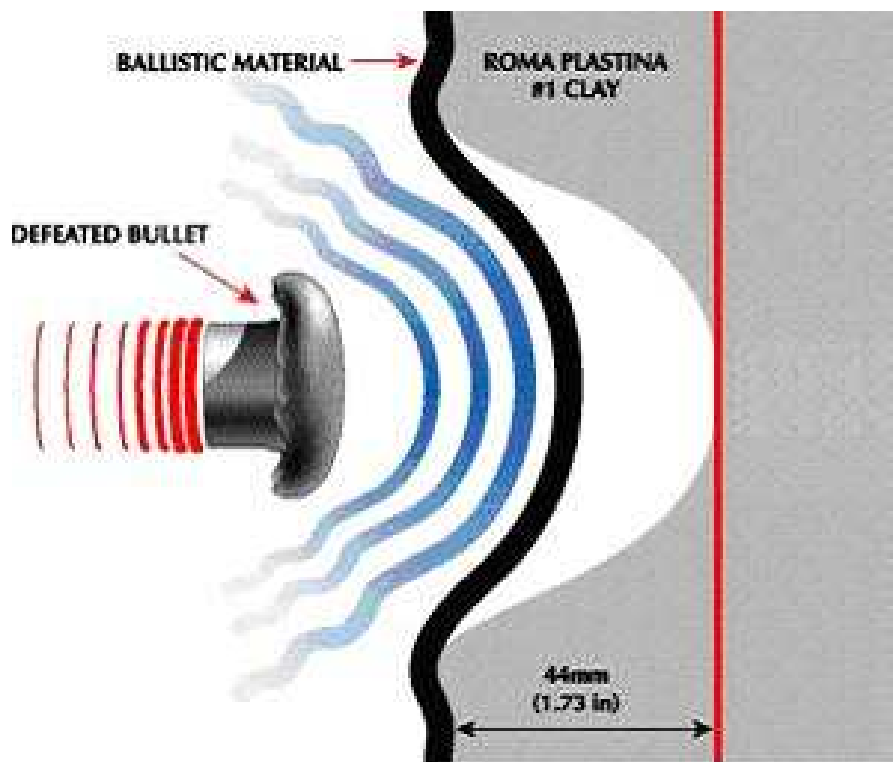
Neprůstřelné vesty:

Ochranné a neprůstřelné vesty mají dlouhou historii. První pokusy probíhaly v USA, jako reakce na zjištění, že za úmrtností většiny pilotů není sestřelení samotného letounu, ale zranění pilota při následném pádu. První vesty byly vyrobeny z ocelových plátů. Do běžné výbavy pilotů se ovšem nedostaly, protože je příliš omezovaly v pohybu. Situace se změnila až v průběhu druhé světové války. Revoluci ve výrobě vest způsobil objev nylonu. Vesty s nylonovým vláknem lze označit za první kompozitní neprůstřelné vesty. Moderní neprů-

střelné vesty jsou vyrobeny z kompozitu s kevlarovou výztuží. Pro speciální potřeby, jako je ochrana proti střelám s vysokou průrazností, je používáno i jiných vláken a svrchních plátů, či destiček z lehkých slitin, keramiky, nebo kompozitu s polymerní matricí. Jelikož je důležité, aby nositel vesty nebyl omezen v pohybu, není možné použít masivní a těžké výztuže. Klasická lehká vesta tudíž zastaví střelu, ale velká část energie je přenesena na tělo. Tím dochází k poškození žeber, v případě zásahu kalibrem dostatečné ráže, i dalších orgánů. Tomu se snaží výrobci předejít použitím materiálů pohlcujících energii střely. Jejich použité množství je opět limitováno již zmíněnými nároky na komfort nošení.



Obr. 35. Neprůstřelná vesta pro skryté nošení [28]



Obr. 36. Chování neprůstřelné vesty při zásahu [29]

Modifikací neprůstřelné vesty je ochranná vesta pyrotechniků. Jelikož pro pyrotechnika není důležitá pohyblivost, je možno vyrábět obleky masivnější a chránící téměř celé tělo.

Přilby:

Zjednodušeně je možné přirovnat kompozitní přilby k ochranným vestám. I zde je použito kevlarových vláken jako součástí balistického materiálu a vnitřní vložky tlumící náraz. Samotná konstrukce je ovšem rozdílná. Kevlarová vlákna jsou vždy v pevné matici (u lehkých vest jsou vlákna v elastomeru, nebo volně a v pevné matici jsou pouze pokud je použito kompozitních vyztužujících plátů). Vnitřek je tvořen tlumící hmotou a upínacím systémem.



Obr. 37. Helma příslušníka US Army po zásahu projektilem [30]

1.6.7 Stavebnictví

Ve stavebnictví je kompozitních materiálů využíváno velice hojně a dlouho (tradičním zástupcem je železobeton). Nově je využíváno stavebních materiálů z moderních kompozitů, s výztuží z uhlíkových a skelných vláken v polymerní matrici. Mezi jejich největší výhody patří samozřejmě poměr hmotnost/nosnost a odolnost povětrnostním vlivům. Uplatnění nachází též kompozity s vlákny a matricemi kovovými či keramickými. Keramické kompozity vynikají především teplotní odolností, což je ve stavebnictví ceněno z bezpečnostního hlediska. Kompozitních profilů je stále více používáno jako nosných prvků lávek a mostů. Taková konstrukce bude použita i při rekonstrukci Hlavního nádraží v Praze. Kompozitních materiálů bylo hojně použito například při stavbě Allianz areny (fotbalový stadion v Mnichově) a stavbách architekta Jana Kaplického.



Obr. 38. Fotbalový stadion Allianz arena v Mnichově [31]



Obr. 39. Kompozitní profil [32]

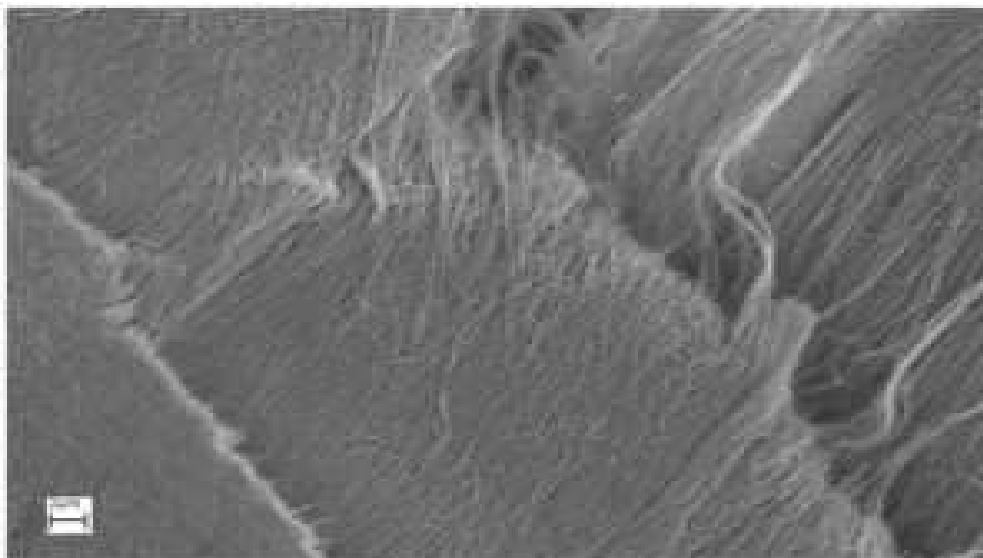
1.6.8 Ostatní průmysl

V průmyslu je kompozitních materiálů požíváno velice hojně. Jedná se o různé tlakové nádoby, nosné konstrukce, části strojů a nepřeberné množství dalších aplikací.

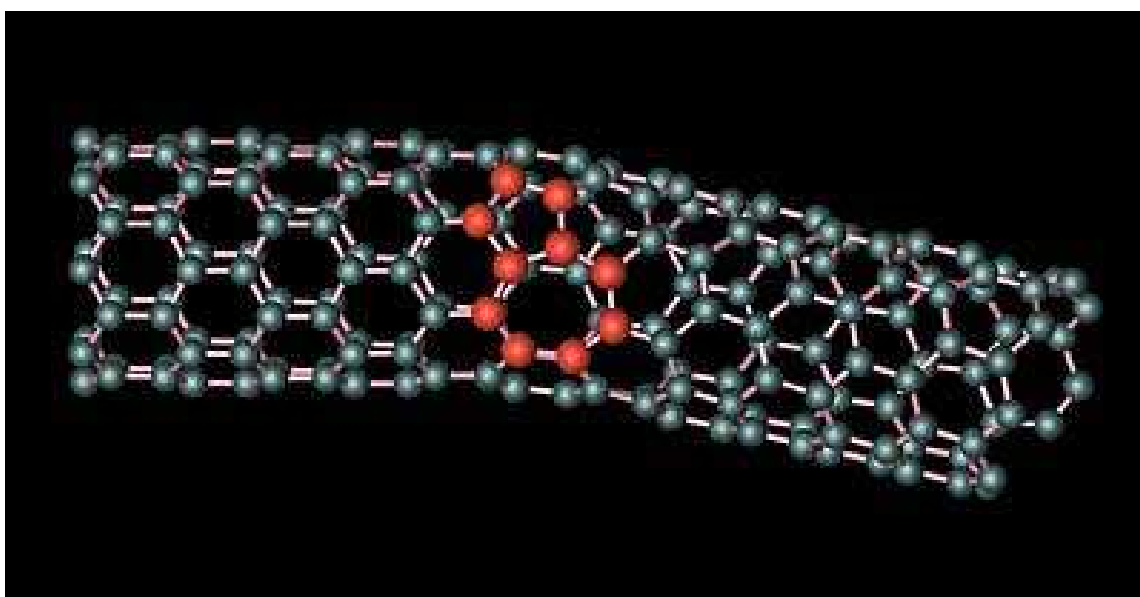
1.7 Nanokompozity

Nanokompozity jsou kompozitní materiály obsahující částice nebo vlákna s alespoň jedním rozměrem v řádu nanometrů. Jedná se o zcela unikátní materiály, jejichž potenciál lze jen těžko odhadnout, ale lze předpokládat, že zcela změní rozsah použití kompozitních materiálů. Například nanotrubičky (uhlíkové trubice s přesně orientovanou strukturou) se chovají při pokojové teplotě jako polovodiče. Za nízkých teplot mohou být supravodivé. Jejich vodivost lze také ovlivnit přítomností iontů. Tyto trubičky jsou také až 100x pevnější než ocel. Pokud je na takovou trubičku nanosen diamantový povlak, vznikne materiál, který je tvrdší než samotný diamant. Jedná se tedy o nejtvrdší známý materiál. Uhlíkové nanotrubičky jsou navíc schopny se v elektrickém poli smršťovat. Kompozit s takovými vlákny má tedy jiné mechanické vlastnosti v elektrickém poli než ve standardním stavu. Nanotrubičky je možno „pěstovat“ z roztoků a mají tendenci se spřádat do vláken, která mohou dosahovat až 100m,

Nejnovější číslo odborného časopisu Nature Nanotechnology uveřejnilo výsledky výzkumu typicky amerického čtyřlístku vědců se jmény Shen, Tong, Zheng, Chen a Henry (posledního prozrazuje křesní jméno Asegun), který dokázal v laboratořích MITu připravit polyetylenová nanovlákna s překvapivě vysokou tepelnou vodivostí, převyšující v této vlastnosti kovy jako železo, chrom, nebo kadmium a konkurující mosazi. V řeči čísel to zní takto: tepelná vodivost běžného polymeru se pohybuje v desetínách wattů na metr a kelvin ($X \times 0.1 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$). Novým nanovláknům vědci naměřili okolo $104 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$. Železo, nebo platina mají v porovnání s touto hodnotou jenom třičtvrtinovou, hliník asi dvounásobnou tepelnou vodivost. [35]



Obr. 40. Rostoucí uhlíkové nanotrubičky [33]



Obr. 41. Model rozložení uhlíkových atomů v nanotrubičce [33]

2 TEPELNÁ VODIVOST

Izolační schopnost materiálů je nejjednodušeji charakterizována konstantou - tepelnou vodivostí λ . Součinitel tepelné vodivosti λ je fyzikálním parametrem látky, který závisí na chemickém složení, vlhkosti, tlaku, teplotě a také hustotě zkoumané látky. Tepelná vodivost je tedy intenzita tepelného toku q dělená gradientem teploty. Tato skutečnost platí pro homogenní izotropní látky.

Intenzita ustáleného tepelného toku je množství tepla prošlého za jednotkový čas τ jednotkovou plochou F kolmou ke směru toku:

$$q = \frac{Q}{F \cdot \tau} \quad (1)$$

Gradient teploty je pokles teploty na malé délce dl ve směru tepelného toku, vztažený na jednotku tloušťky. Pro určitou tloušťku δ je tedy součinitel tepelné vodivosti dán vztahem:

$$\lambda = \frac{Q}{F \cdot \tau} \cdot \frac{d\delta}{dt} \quad (2)$$

Součinitel tepelné vodivosti hmoty, jakožto její schopnost vést teplo, udává množství tepla ve W , které projde při ustáleném stavu zkoušenou deskou jednotkové plochy a tloušťky za 1 s při teplotním gradientu $1 \text{ K}\cdot\text{m}^{-1}$.

Již z tohoto vztahu plyne, že ztráty tepla vedením jsou tím větší, čím menší je tloušťka a čím větší je tepelná vodivost daného materiálu při stejném teplotním gradientu. Z ekonomického i technického hlediska je výhodné používat materiálů, které mají velkou tloušťku. Tloušťka materiálu je většinou dána již celkovou konstrukcí, a proto směrodatnou hodnotou pro minimum tepelných ztrát je tepelná vodivost.

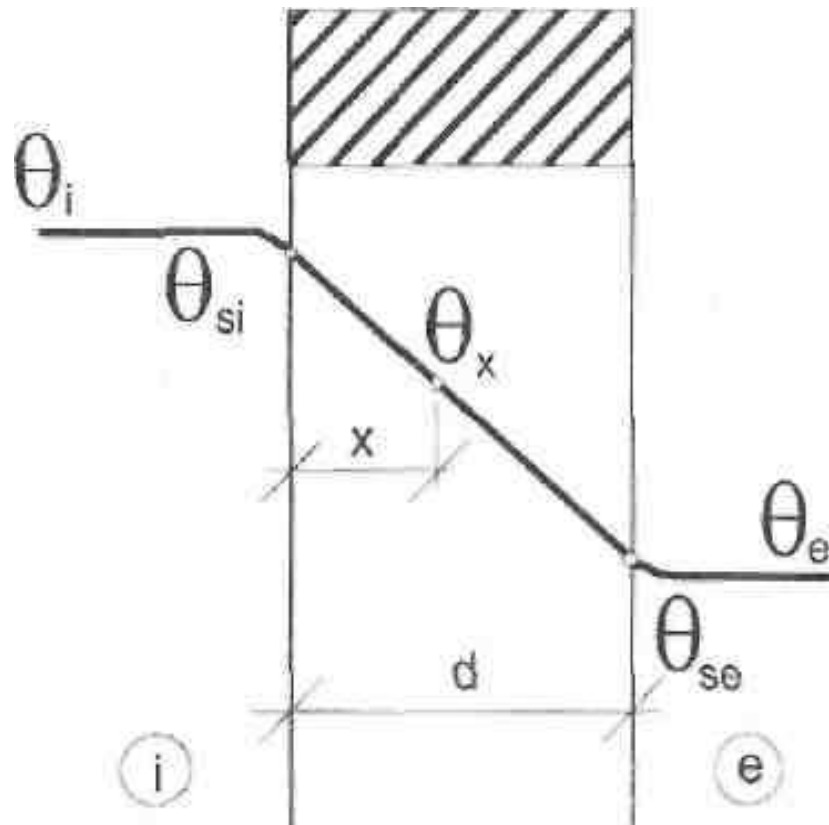
Veškeré heterogenní příměsi mohou tepelnou vodivost značně změnit. Největší vliv má vzduch. Porézní materiály mají vodivost vždy podstatně menší než materiály hutné. Vyplyvá to z nízké hodnoty tepelné vodivosti vzduchu. Proto izolační materiály jsou obvykle porézní. Tepelná vodivost se na základě molekulárně kinetické teorie vysvětluje jako šíření

tepelných vln. U polymerů prochází tepelné vlny střídavě oblastmi s dobrými a se špatnými podmínkami šíření. U krystalických materiálů tepelné vlny způsobují vibraci prostorových mřížek. V případě čistě amorfních materiálů jsou podmínky šíření tepelných vln daleko horší. Tepelné vlny jsou vlivem vnitřní nepravidelné struktury silně rozptylovány a také odráženy. Cizí látky v polymeru, které v tomto případě působí jako přídavná rozptylová centra, tepelnou vodivost u polymerů snižují. Z tohoto důvodu mají krystalické polymery součinitel tepelné vodivosti větší než polymery amorfní.

Zjišťování součinitele tepelné vodivosti lze provést v podstatě několika způsoby, které jsou především určeny tepelným režimem, v němž se dané měření uskutečňuje. Nejčastěji se měření provádí ve stacionárním, nebo nestacionárním režimu. Pro každý z těchto způsobů bylo v praxi vypracováno několik konkrétních metod, které se úspěšně používají v praxi. Obecně lze říci, že pro materiály dobře tepelně vodivé postačí stacionární metody a pro tepelné izolanty jsou vhodnějšími metodami metody nestacionární.

2.1 Tepelný odpor

Pojem tepelného odporu stavební konstrukce je odvozen pro jednorozměrné teplotní pole za předpokladu ustáleného teplotního stavu. Předpokládejme tedy, že jednovrstvá stavební konstrukce rozděluje dvě prostředí s různými, ale konstantními teplotami. Rozdělení teplot v konstrukci musí být též konstantní a libovolný bod v konstrukci lze jednoznačně popsat pomocí jedné jeho souřadnice, to je souřadnice x . Schéma konstrukce včetně vyznačení okrajových podmínek (předpokládáme zimní období) je na obr. 34.



Obr. 42 Schéma konstrukce pro odvození tepelného odporu [34]

Vzhledem k tomu, že předpokládáme šíření tepla vedením, použijeme k odvození pojmu tepelného odporu první a druhý Fourierův zákon.

$$q = -\lambda \frac{d\theta}{dx} \quad (3)$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = a \cdot \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} \quad (4)$$

Úpravou druhého Fourierova zákona pro podmínky ustáleného teplotního stavu a jedno-rozměrného teplotního pole pak získáme vztah

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = 0 \rightarrow \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} = 0 \quad (5)$$

Dosažením okrajových podmínek a řešením diferenciální rovnice získáme vztah pro určení teploty v libovolném místě konstrukce

$$\theta = \theta_{si} - \frac{\theta_{si} - \theta_{se}}{d} x \quad (6)$$

z něhož je zřejmé, že teplota v konstrukci je lineárně závislá na souřadnici x , že se tedy jedná o rovnici přímky, jejíž směrnice je

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{\theta_{si} - \theta_{se}}{d} \quad (7)$$

Lze tedy psát

$$q = \lambda \frac{\theta_{si} - \theta_{se}}{d} = \frac{\theta_{si} - \theta_{se}}{\frac{d}{\lambda}} = \frac{\theta_{si} - \theta_{se}}{R} \quad (8)$$

kde je $R = \frac{d}{\lambda}$ tepelný odpor konstrukce ($\text{m}^2 \text{K W}^{-1}$) (9)

Vztah (18) platí pro jednovrstvou konstrukci za předpokladu homogenity této vrstvy a její kolmosti ke směru tepelného toku. Za stejného předpokladu lze vyčíslit i tepelný odpor vícevrstvé konstrukce, kdy vzhledem k tomu, že tepelný odpor je aditivní veličina, lze napsat

$$R = \sum_{j=1}^{j=n} R_j = R_1 + R_2 + \dots + R_n = \sum_{j=1}^{j=n} \frac{d_j}{\lambda_j} \quad (10)$$

[34]

2.2 Vyhodnocení měření tepelné vodivosti

2.2.1 Matematický model měření

Pro odvození matematického modelu popisující závislost teploty měřícího válečku na čase vycházíme z následující bilance tepla.

$$-K \frac{dt}{d\tau} = \frac{S\lambda(t-t_1)}{\delta} + B(t-t_1) \quad 0 < \tau < \infty \quad (11)$$

$$t(0) = t_2 = 35^\circ\text{C}$$

kde K - tepelná kapacita měřicího válečku ($J.K^{-1}$)
 S - plocha vzorku (m^2)
 λ - tepelná vodivost ($W.m^{-1}.K^{-1}$)
 t - snímaná teplota měřicího válečku ($^{\circ}C$)
 t_1 - teplota temperační desky 1 ($^{\circ}C$)
 t_2 - počáteční teplota měřicího válečku ($^{\circ}C$)
 δ - tloušťka vzorku (m)
 B - koeficient tepelných ztrát ($J.s^{-1}.K^{-1}$)
 τ - čas (s)

pro B platí:

$$B = \alpha \cdot S_z \quad (12)$$

kde α - je koeficient přestupu tepla ($W.m^{-2}.K^{-1}$)
 S_z - plocha, na níž dochází ke ztrátám (m^2)

Pravá strana rovnice (11) představuje tok tepla přes hmotu vzorku bloku 1 do měřicího válečku. Zde jsou započítány i ztráty tepla vzniklé přirozeným prouděním vzduchu kolem měřicího přístroje.

Levá strana rovnice (11) představuje akumulaci tepla v měřicím válečku.

Řešením rovnice (11) dostaneme:

$$t = t_1 - (t_1 - t_2) \cdot \exp(-(A_1 + A_2) \cdot \tau) \quad (13)$$

kde pro A_1 a A_2 platí vztahy:

$$A_1 = \frac{S\lambda}{\delta K} \quad (14)$$

$$A_2 = \frac{B}{K} \quad (15)$$

$$A_3 = A_1 + A_2 \quad (16)$$

kde parametr A_2 vyjadřuje tepelné ztráty do okolí a pro námi používanou měřicí aparaturu v daných laboratorních podmínkách $A_2 = 263 \cdot 10^{-6} \text{ s}^{-1}$

Vyhodnocení se provádí podle matematického modelu:

$$t = a_1 + a_2 \cdot \exp(a_3 \cdot \tau) \quad (17)$$

a parametry a_1 , a_2 , a_3 se vyhodnocují nelineární regresí. Tepelná vodivost se pak získá podle plochy a tloušťky vzorku z parametru a_3 .

Obecně lze konstatovat, že měření tepelné vodivosti nestacionární metodou je vzhledem k metodám stacionárním časově méně náročné a tím se tyto metody stávají více prakticky využitelnými.

II. PRAKTICKÁ ČÁST

3 MĚŘENÍ TEPELNÉ VODIVOSTI VZORKŮ KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ

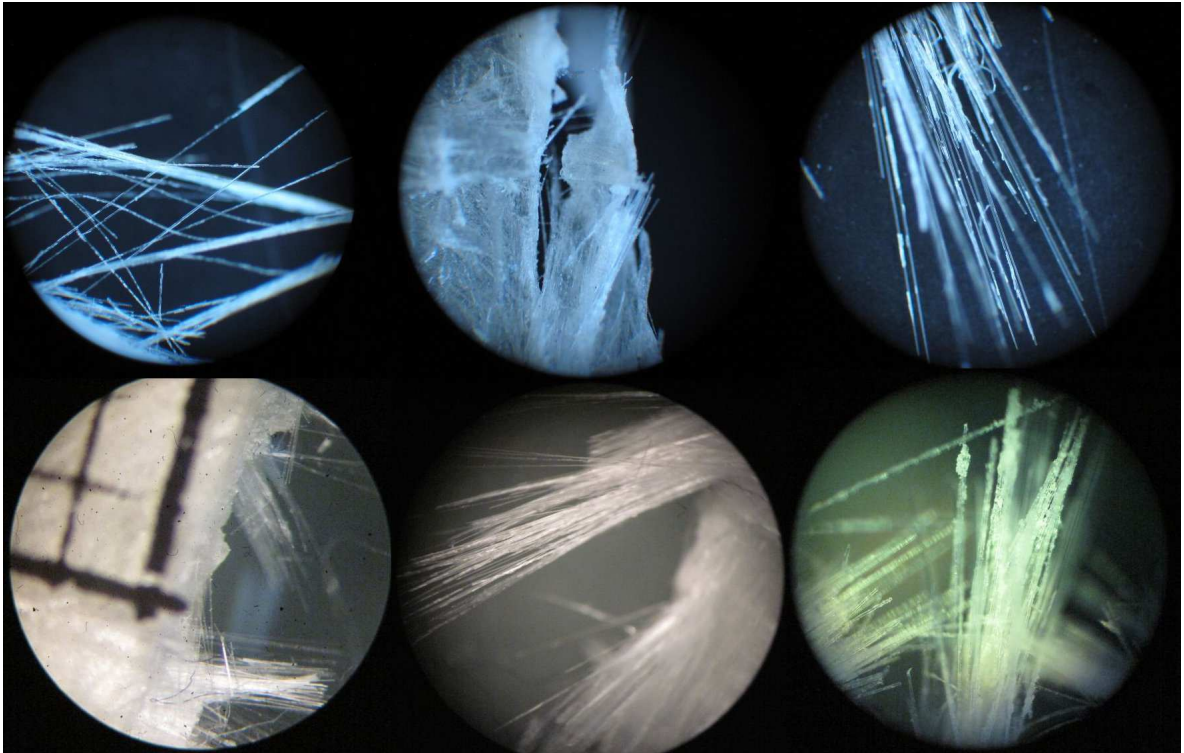
3.1 Charakteristika a příprava měřených vzorků

Testované vzorky dodala společnost Reichhold založená Henrym Reichholdem v roce 1927. Jedná se o jednoho z nejvýznamnějších světových výrobců polyesterových pryskyřic a nátěrových hmot, který vlastní 19 provozů a 4 technologická centra včele s ústředím v USA. Tato firma s osmdesátiletou tradicí zaměstnává více než 1400 lidí, kteří vyvíjejí inovativní materiály, jako jsou ekologicky šetrné pryskyřice Envirolite a další hi - tech materiály.

Vzorky byly připraveny ve formě plošných válců o rozměru podstavy $0,006362 \text{ m}^2$.

Tab. 1. Tabulka vlastností materiálů

Materiál č.	Tloušťka [m ²]	Doporučené zpracování
1	2,666	Navíjení
2	3,511	Navíjení
3	7,209	Ruční laminování
4	6,081	Navíjení



Obr. 43 Zobrazení vláken vybraných vzorků vytržených z matrice při destrukci materiálu (Nahoře zobrazení metalografickým mikroskopem a dole klasickým)

Složení vzorků:

Materiál 1: Polyesterová laminační pryskyřice určená k navíjení, vyšší HDT, tereftalový typ, 4x prášková skelná výztuž 450g/m²

Materiál 2: Polyesterová laminační pryskyřice určená k navíjení, vyšší HDT, tereftalový typ, 4x prášková skelná výztuž 450g/m²

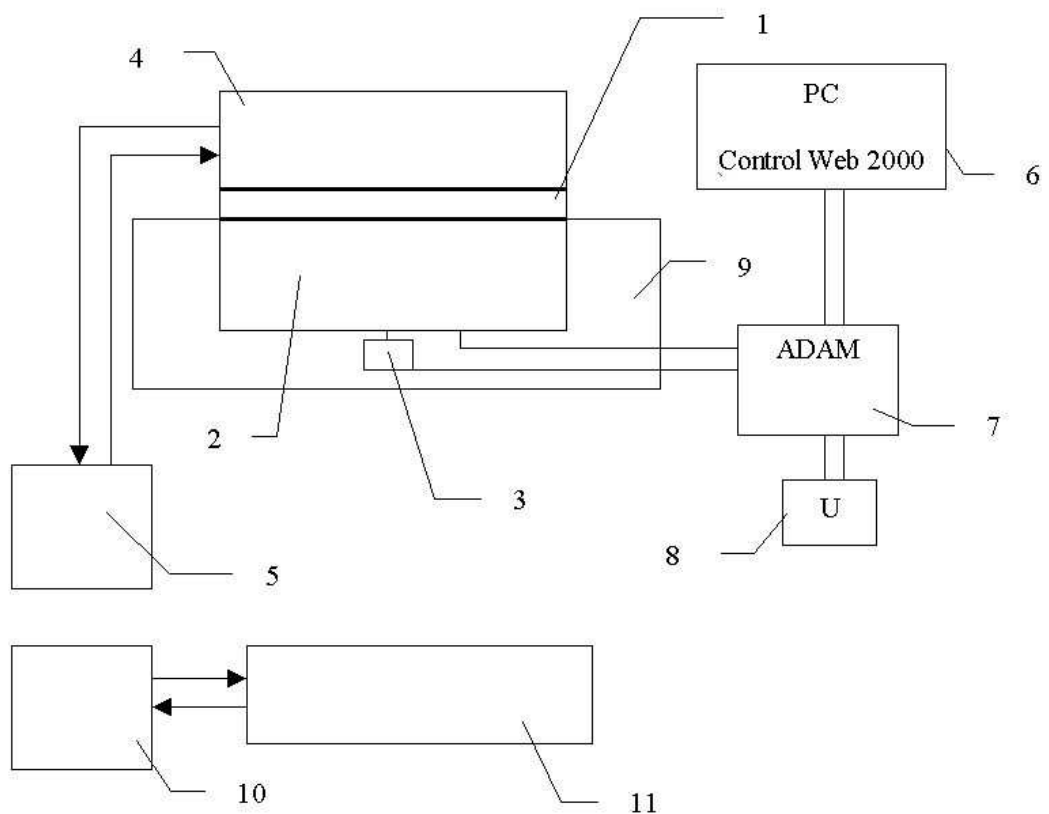
Materiál 3: Dicyklopentadienová pryskyřice určená pro ruční laminování, s nižším obsahem styrenu, 10x emulsní skelná výztuž 450g/m² (17x35cm)

Materiál 4: Polyesterová laminační pryskyřice určená k navíjení, s vyšší HDT, tereftalový typ, 4x prášková skelná výztuž 450g/m²

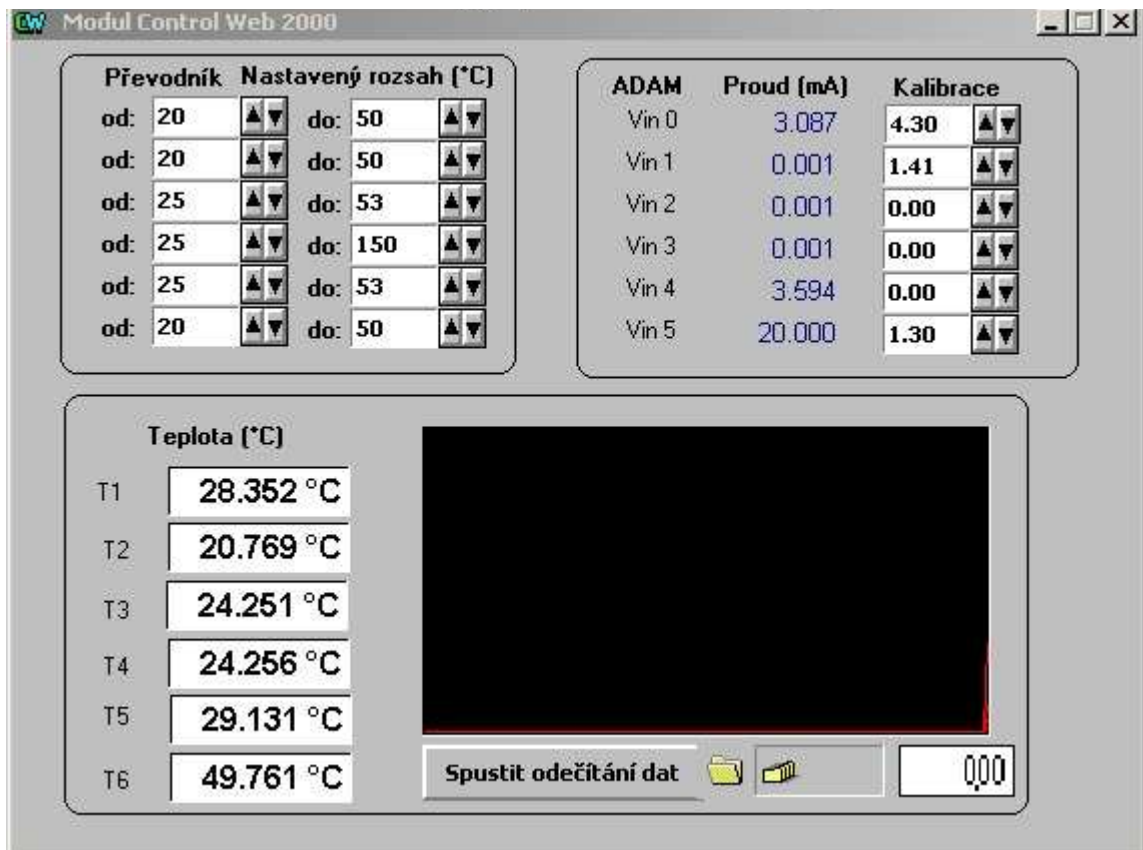
3.2 Popis měření

Pro měření závislosti teploty na čase byl použit přístroj podle Fitcha, jehož schéma je vyobrazeno níže. Měřený materiál o teplotě t_1 (1) je vložen mezi dva mosazné válce. Měřicí válec (2) vytemperovaný na teplotu t_1 je připojen na termočlánek typu měď – konstantan (3). Vrchní válec (4) je připojen na termostat (5) a jím temperován na t_2 . Současně je spuštěn

těno zaznamenávání teploty programem Control web 2000 nainstalovaném na osobním počítači (6). Jako převodníku je použito systému ADAM (7) spojeného s osobním počítačem komunikačním portem. Převodník je napájen zdrojem stejnosměrného proudu (8). Ztráty tepla do okolí jsou sníženy izolací (9). K temperaci vzorku a válce (2) slouží mosazný válec (10) spojený s termostatem (11). Průběh poklesu teploty měřícího válce (2) v čase zaznamenává program Control web 2000. Po ukončení odečítání dat je možné data vyhodnotit pomocí programu NeReg 02.



Obr. 44. Schéma měřícího přístroje



Obr. 45. Pracovní prostředí modulu Control Web 2000

3.3 Vyhodnocení tepelné vodivosti pomocí programu NeReg 02

Program NeReg 02 vyhodnocuje data nelineární regreseí Gauss – Newtonovou metodou. Výsledkem jsou parametry rovnice (23) a_1 , a_2 , a_3 , které potřebujeme k výpočtu tepelné vodivosti.

3.3.1 Postup vyhodnocení

Pro provedení výpočtu je třeba načíst data ze souboru ve formátu dBaseIV. Dále je nutné označit data a sloupce pro výpočet.

	T1	T2	T3	T4	T5	T6	CAS
	27.60	49.87	24.25	24.26	27.85	49.76	2 885.00
	27.55	49.87	24.25	24.26	27.64	49.76	2 895.00
	27.60	49.87	24.25	24.26	28.28	49.76	2 905.00
	27.63	49.87	24.25	24.26	28.53	49.76	2 915.00
	27.55	49.87	24.25	24.26	28.15	49.76	2 925.00
	27.46	49.87	24.25	24.26	28.36	49.76	2 935.00
	27.46	49.87	24.25	24.26	28.49	49.76	2 945.00
	27.53	49.87	24.25	24.26	28.32	49.76	2 955.00
	27.53	49.87	24.25	24.26	28.18	49.76	2 965.00
	27.47	49.87	24.25	24.26	28.20	49.76	2 975.00
	27.48	49.87	24.25	24.26	27.90	49.76	2 985.00
	27.43	49.87	24.25	24.26	28.25	49.76	2 995.00
	27.44	49.87	24.25	24.26	27.88	49.76	3 005.00
	27.40	49.87	24.25	24.26	27.61	49.76	3 015.00
	27.51	49.87	24.25	24.26	27.45	49.76	3 025.00

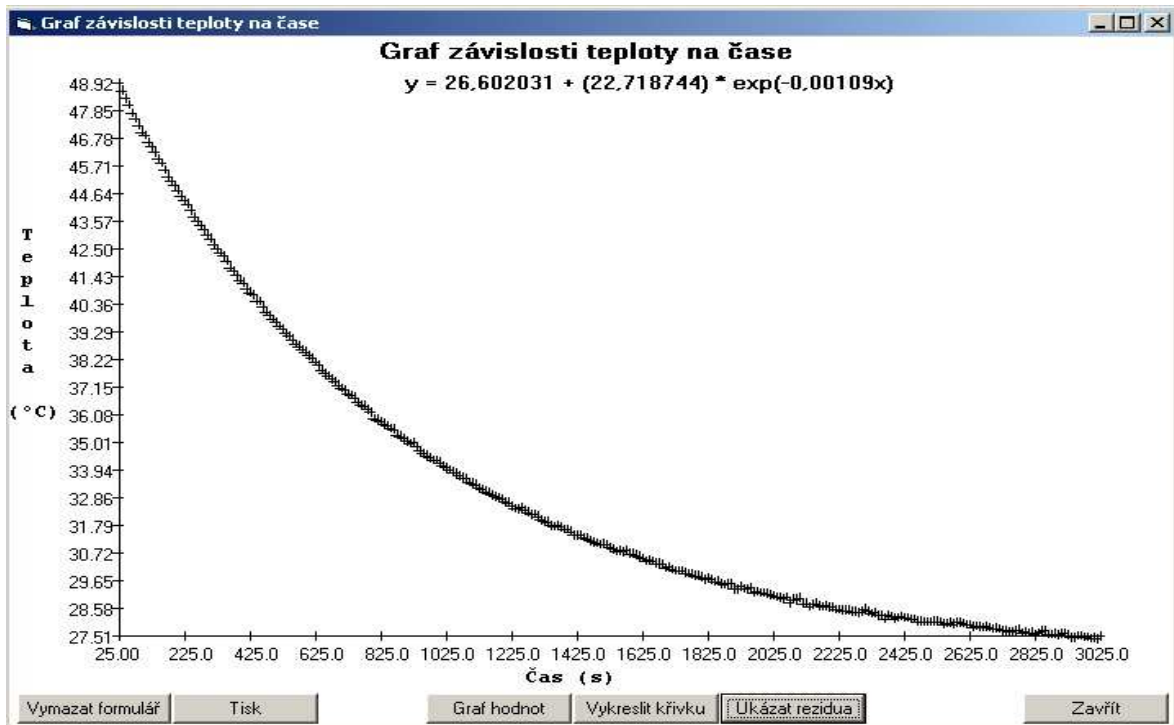
Obr. 46. Zobrazení naměřených dat v programu NeReg02

Po stisku tlačítka *Provést výpočet* se otevře okno *Výsledky výpočtů*. Stiskem tlačítka *Graf* je načten graf závislosti teploty na řase. Před samotným výpočtem je důležité zkontrolovat reziduální rozptyl stiskem tlačítka *Ukázat rezidua*.

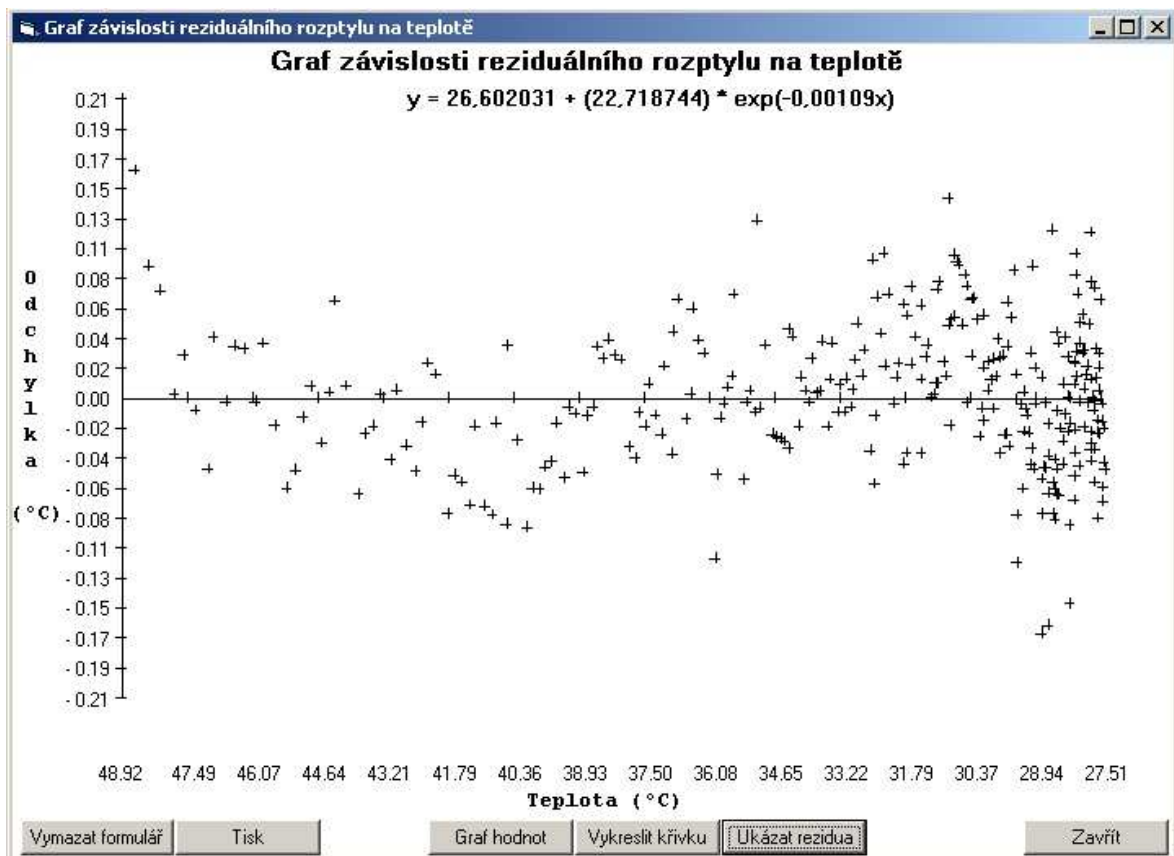
Odhady parametrů :		koficient korelace =	
a1 =	26.602031	0.999959	
a2 =	22.718744	reziduální rozptyl =	0.0027
a3 =	-0.00109	počet měření =	301

Korelační matice :				Kovarianční matice :			
	a1	a2	a3		a1	a2	a3
a1	1	-0.2765	-0.8864	a1	0,0001	0	0
a2	-0.2765	1	-0.0796	a2	0	0,0001	0
a3	-0.8864	-0.0796	1	a3	0	0	0,0001

Obr. 47. Okno výpočtů programu NeReg02



Obr. 48. Teplotní křivka chlazení vzorku vytvořená programem NeReg02



Obr. 49. Závislost reziduálního rozptylu na teplotě

Po otevření okna *Výpočet tepelné vodivosti* stejnojmenným tlačítkem v okně *Výsledky výpočtů*, je nutné zadat parametry rovnice. Po stisknutí tlačítka *Vypočítat*, provede program výpočet a zobrazí hodnotu tepelné vodivosti.

Matematické znázornění znázornění teploty měřícího válečku na čase popisuje následující bilance.

$$-K \frac{dt}{d\tau} = \frac{S\lambda(t-t_1)}{\delta} + B(t-t_1) \quad 0 < \tau < \infty \quad (18)$$

$$t(0) = t_2 = 35^\circ\text{C}$$

B vypočítáme pomocí:

$$B = \alpha \cdot S_z$$

K - tepelná kapacita měřícího válečku [J.K⁻¹]

τ - čas [s]

t - snímaná teplota měřícího válečku [°C]

t₁ - teplota temperačního válce [°C]

S - plocha vzorku [m²]

λ - tepelná vodivost [W.m⁻¹.K⁻¹]

t₂ - počáteční teplota měřícího válce [°C]

δ - tloušťka vzorku [m]

B - koeficient tepelných ztrát [J.s⁻¹.K⁻¹]

t - snímaná teplota měřícího válečku [°C]

t₁ - teplota temperační desky 1 [°C]

Pravá strana rovnice (11) vyjadřuje tok tepla přes hmotou vzorku do měřícího válečku včetně vyjadřuje akumulaci tepla v měřícím válečku.

Řešením rovnice (11) dostaneme:

$$t = t_1 - (t_1 - t_2) \cdot \exp(-(A_1 + A_2) \cdot \tau) \quad (19)$$

Pro A_1, A_2 platí:

$$A_1 = \frac{S\lambda}{\delta K} \quad (20)$$

$$A_2 = \frac{B}{K} \quad (21)$$

$$A_3 = A_1 + A_2 \quad (22)$$

Parametr A_2 vyjadřuje tepelné ztráty systému do okolí a pro námi použitou měřící aparaturu je v laboratorních podmínkách $A_2 = 263 \cdot 10^{-6} \text{ s}^{-1}$

Vyhodnocení matematického modelu:

$$t = A_1 + A_2 \cdot \exp(a_3 \cdot \tau) \quad (23)$$

a parametry a_1, a_2, a_3 byly vyhodnoceny nelineární regresí a tepelná vodivost poté vypočítána z plochy a tloušťky vzorku z parametru a_3 .

Jelikož je nestacionární měření tepelné vodivosti méně časově náročné, jsou tyto metody lépe použitelné v praxi, než metody stacionární.

3.3.2 Vzorový příklad výpočtu koeficientu tepelné vodivosti

Pro výpočet je nezbytné vypočítat parametr A_1 podle následující rovnice

$$A_1 = -A_3 - A_2 = 0,00109 - 0,000263 = 0,000827 \text{ s}^{-1} \quad (24)$$

Samotný výpočet tepelné vodivosti je prováděn podle rovnice

$$\lambda = \frac{A_1 \cdot \delta \cdot K}{S} = \frac{0,005087 \cdot 0,00014 \cdot 317,5}{0,006362} = 0,0355 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1} \quad (25)$$

Výpočet tepelné vodivosti

K = 317,5 (J.K⁻¹)

S = 0,006362 (m²)

δ = 0,00266 (m)

a3 = -0,00109 (s⁻¹)

a2 = 0,000263 (s⁻¹)

a1 = a3 - a2

$$\lambda = \frac{a1 \cdot \delta \cdot K}{S} \quad \text{-1}$$

λ = -0.17961 (W.m.K⁻¹)

Vypočítat Zavřít

K - tepelná kapacita měřícího válečku
 S - plocha vzorku
 δ - tloušťka vzorku
 λ - tepelná vodivost
 a3 - parametr vyhodnocený nelineární regresí
 a2 - parametr vyhodnocený slepým pokusem

K - tepelná kapacita měřícího válečku [J.K⁻¹]

S - Plocha měřícího válečku [m²]

δ - tloušťka vzorku [m]

A₁ - parametr rovnice [s⁻¹]

A₂ - tepelné ztráty do okolí [s⁻¹]

A₃ - parametr nelineární regrese [s⁻¹]

λ tepelná vodivost [W . m⁻¹ . K⁻¹]

Obr. 50 Výpočtové okno programu NeReg02

3.4 Výpočet tepelného odporu

Vzorový příklad výpočtu tepelného odporu vzorku č. 1.

$$\delta = 2,66 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

$$\lambda = 0,18621 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$$

Tepelný odpor lze vypočítat podle následujícího vztahu:

$$R = \frac{\delta}{\lambda} = \frac{0,002666}{0,18621} = 0,014317 \text{ W}^{-1}.\text{m}^2.\text{K}$$

λ průměrná tepelná vodivost vybraného vzorku [W.m⁻¹.K⁻¹]

R tepelný odpor [W⁻¹.m².K]

δ tloušťka vzorku [m]

3.5 Výsledné hodnoty tepelné vodivosti a tepelného odporu vybraných kompozitních materiálů

Tab. 2. Tabulka naměřených hodnot tepelné vodivosti

Materiál č.	Tepelná vodivost λ [$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$]			
	λ_1	λ_2	λ_3	Průměrná λ
1	0,17961	0,18268	0,19634	0,18621
2	0,19099	0,19099	0,20483	0,19560
3	0,32020	0,32667	0,34070	0,32919
4	0,26858	0,26736	0,27677	0,27090

Tab. 3. Tabulka vypočtených hodnot tepelných odporů

Materiál č.	Tloušťka vzorku [mm]	λ [$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$]	R [$\text{W}^{-1}\cdot\text{m}^2\cdot\text{K}$]
1	2,666	0,18621	0,014317
2	3,511	0,19560	0,017949
3	7,209	0,32919	0,021899
4	6,081	0,27090	0,022447

Na základě naměřených a vyhodnocených výsledků lze konstatovat, že nejlepší tepelně-izolační vlastnosti, tedy materiál s nejmenší hodnotou koeficientu tepelné vodivosti, má materiál číslo 1, který vykazuje hodnotu $\lambda = 0,18621 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$. Naopak nejhorším tepelně-izolačním materiálem je materiál číslo 3, kdy hodnota koeficientu tepelné vodivosti dosáhla hodnoty $0,32919 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$.

Tedy lze říci, že lepší tepelně-izolační vlastnosti mají kompozitní materiály, které mají jako matici polyesterovou pryskyřici. Naopak horší tepelně-izolační vlastnosti mají kompozitní materiály s maticí na bázi dicyklopentadienové pryskyřice.

Z pohledu tepelného odporu, tedy přepočtu koeficientu tepelné vodivosti s ohledem na tloušťku materiálu, lze na základě vyhodnocených výsledků říci, že nejmenšího tepelného odporu, tedy schopnosti materiálu odporovat přestupu tepla, vykazoval materiál číslo 1, zatímco nejvyšší hodnoty tepelného odporu dosáhl materiál číslo 4.

ZÁVĚR

Tato bakalářská práce se zabývá studiem tepelných vlastností kompozitních materiálů.

V teoretické části se tato práce zabývá kompozitními materiály, konkrétně výztužemi vláknitých kompozitů, formami výztuží, matricemi kompozitních materiálů a některými výrobními postupy kompozitních materiálů s polymerní matricí. Dále je v této části zpracována problematika použití kompozitních materiálů se zaměřením na speciální aplikace zejména v letectví, lodní dopravě, energetice, armádě a dalších.

Pro měření a vyhodnocení byly vybrány kompozitní materiály na bázi polyesterové laminární pryskyřice tereftalátového typu a dicyklopentadienové pryskyřice s nižším obsahem styrenu společnosti Reichhold Ltd.

Na základě naměřených a vyhodnocených výsledků lze konstatovat, že nejlepší tepelně-izolační vlastnosti, tedy materiál s nejmenší hodnotou koeficientu tepelné vodivosti, má materiál číslo 1, který vykazuje hodnotu $\lambda = 0,18621 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$. Naopak nejhorším tepelně-izolačním materiálem je materiál číslo 3, kdy hodnota koeficientu tepelné vodivosti dosáhla hodnoty $0,32919 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$.

Tedy lze říci, že lepší tepelně-izolační vlastnosti mají kompozitní materiály, které mají jako matrici polyesterovou pryskyřici. Naopak horší tepelně-izolační vlastnosti mají kompozitní materiály s matricí na bázi dicyklopentadienové pryskyřice.

Z pohledu tepelného odporu, tedy přepočtu koeficientu tepelné vodivosti s ohledem na tloušťku materiálu, lze na základě vyhodnocených výsledků říci, že nejmenšího tepelného odporu, tedy schopnosti materiálu odporovat přestupu tepla, vykazoval materiál číslo 1, zatímco nejvyšší hodnoty tepelného odporu dosáhl materiál číslo 4.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] www.bimmerfest - diskusní fórum příznivců automobilů značky BMW [online], Dostupné z WWW 27.5.2010
<http://www.bimmerfest.com/forums/showthread.php?p=4300095>
- [2] DAĐOUREK Karel. *Kompozitní materiály - druhy a jejich využití*. Liberec : Technická univerzita v Liberci, 2007.
- [3] mmspektrum.cz - internetové stránky časopisu MMSPEKTRUM [online], Dostupné z WWW 27.5.2010
<http://www.mmspektrum.com/clanek/kompozitni-materialy-v-letectvi>
- [4] 5m.cz – Výrobce epoxidových lepidel, prepregů a kompozitních dílů [online], Dostupné z WWW 27.5.2010
<http://www.5m.cz/cz/semipreg-prepreg-1/>
- [5] JANČÁŘ Josef. *Úvod do materiálového inženýrství polymerních kompozitů*. Brno : Vysoké učení technické v Brně, 2003
- [6] B2B – internetové stránky informačního serveru zabývající se průmyslovou výrobou [online], Dostupné z WWW 27.5.2010
<http://ebuying.com.tw/>
- [7] MATHEWS, F. L.; RAWLINGS, R.D. *Composite materials : engineering and science*. USA : Wood head publishing Limited, 2003
- [8] volny.cz/zkorinek – osobní www stránky Ing. Zdeňka Kořínka, CSc. [online], Dostupné z WWW 27.5.2010
<http://www.volny.cz/zkorinek/technologie.pdf>
- [9] stefanmichna.com – osobní stránky Doc. Ing. Štefana Michny, PhD. [online], Dostupné z WWW 27.5.2010
http://www.stefanmichna.com/download/technicke-materialy_II/kompozitni_materialy.pdf
- [10] borealdesign.com – výrobce kajaků [online], Dostupné z WWW 27.5.2010
<http://www.borealdesign.com/en/mc/Usinedekayaksencomposite.php>
- [11] MATHEWS, F. L.; RAWLINGS, R.D. *Composite materials : engineering and science*. USA : Wood head publishing Limited, 2003

- [12] autosportfoto.sk – fotografie automobilů [online], Dostupné z WWW 27.5.2010
<http://www.autosportfoto.sk/galeria/cesko/fabia-s2000-v-kit-racing-u?lpage=1>
- [13] autosportfoto.sk – fotografie automobilů [online], Dostupné z WWW 27.5.2010
<http://www.autosportfoto.sk/galeria/cesko/fabia-s2000-v-kit-racing-u>
- [14] nextautos.com – automobilový www magazín [online], Dostupné z WWW 27.5.2010
<http://www.nextautos.com/channel/design-autoshows?page=29>
- [15] mmspektrum.cz - internetové stránky časopisu MMSPEKTRUM [online], Dostupné z WWW 27.5.2010
<http://www.mmspektrum.com/clanek/nejmodernejsi-letadlova-lod-sveta-spustena-a-pokrtena>
- [16] reichhold.com – výrobce kompozitních materiálů [online], Dostupné z WWW 27.5.2010
www.reichhold.com
- [17] ortotikaprotetika.cz – portál zabývající se ortetikou a protetikou [online], Dostupné z WWW 27.5.2010
<http://www.ortotikaprotetika.cz/oldweb/Wc1bf9e310a721.htm>
- [18] dahlhausen.cz – výrobce zdravotnických potřeb [online], Dostupné z WWW 27.5.2010
<http://www.dahlhausen.cz/katalog/zdravotnicky-material/cevni-nahrada-omniflow-ii-vnirni-216-5-mm-delka-65-cm-652/>
- [19] beznoska.cz – výrobce kloubních náhrad [online], Dostupné z WWW 27.5.2010
<http://www.beznoska.cz/co-nabizime/kycle/cementovany-drik-tep-kycelniho-kloubu-tyt-csc.html>
- [20] pleo.cz – výrobce kompozitních izolantů [online], Dostupné z WWW 27.5.2010
<http://www.pleo.com/fcm/fcm.htm>
- [21] prefa-kompozity.cz – výrobce kompozitních materiálů [online], Dostupné z WWW 27.5.2010
<http://www.prefa-kompozity.cz/produkty/energetika/>

- [22] powerinsulator.com – výrobce elektrických izolátorů [online], Dostupné z WWW 27.5.2010
<http://www.powerinsulator.com/showproduct.asp?id=72>
- [23] bikeworld.pl – cyklistický portál [online], Dostupné z WWW 27.5.2010
<http://news.bikeworld.pl/rower/artukul/1833/szukaj:uratec/>
- [24] axisport.cz – prodejce cyklistických potřeb [online], Dostupné z WWW 27.5.2010
http://www.axisport.cz/index.php?main_page=product_info&cPath=98&products_id=3903
- [25] supplierlist.com – výrobce silničních kol [online], Dostupné z WWW 27.5.2010
http://www.supplierlist.com/product_view/twcarb/25947/101306/Carbon_fiber_bicycle_frame_manufaturer_monocoque_.htm
- [26] <http://news2dago.blaogy.com> - www blog [online], Dostupné z WWW 27.5.2010
<http://news2dago.blaogy.com/post/770/6293>
- [27] idnes.cz – internetové stránky MF DNES [online], Dostupné z WWW 27.5.2010
http://technet.idnes.cz/prvni-neviditelna-lod-na-svete-nastupuje-do-armady-f8f-/tec_technika.asp?c=A090209_225407_tec_technika_rja
- [28] armyshop-pro.cz - internetový prodejce armádního materiálu [online], Dostupné z WWW 27.5.2010
<http://www.armyshop-pro.cz/Detail.aspx?ZboziID=6616>
- [29] www.dfens-cz.com / informační server [online], Dostupné z WWW 27.5.2010
<http://www.dfens-cz.com/view.php?cislocclanku=2008042707>
- [30] tn.nova.cz – informační server TV NOVA [online], Dostupné z WWW 27.5.2010
<http://tn.nova.cz/magazin/historie/lide/prezil-zasah-odstrelovackou-byl-vyhlasen-nejvetsim-stistkem-v-afghanistanu.html>
- [31] wikipedia.org – otevřená encyklopedie [online], Dostupné z WWW 27.5.2010
http://cs.wikipedia.org/wiki/Soubor:Allianz_Arena_Pahu.jpg
- [32] [ronn.cz](http://www.ronn.cz) – výrobce kompozitních materiálů [online], Dostupné z WWW 27.5.2010
<http://www.ronn.cz/produkty/kompozity-pouziti/>
- [33] wikipedia.org – otevřená encyklopedie [online], Dostupné z WWW 27.5.2010
http://cs.wikibooks.org/wiki/Fullereny_a_nanotrubi%C4%8Dky

- [34] KULHÁNEK František. *Stavební fyzika II : Stavební tepelná technika*. Praha : České vysoké učení technické , 2006.
- [35] osel.cz – vzdělávací server [online], Dostupné z WWW 27.5.2010
<http://www.osel.cz/index.php?clanek=4924>
- [36] beznoska.cz – výrobce kloubních náhrad [online], Dostupné z WWW 27.5.2010
<http://www.beznoska.cz/res/data/004/000711.pdf>
- [37] informační server s válečnou tematikou [online], Dostupné z WWW 27.5.2010
http://www.valka.cz/clanek_10600.html
- [38] Merida Bike – výrobce jízdních kol [online], Dostupné z WWW 27.5.2010
<http://www.merida-bike.cz/clanek/628>
- [39] Střelci – informační server o zbraních [online], Dostupné z WWW 27.5.2010
<http://www.strelci.com/modules.php?name=News&file=print&sid=142>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Q	Hustota tepelného toku ($W m^{-2}$)
grad θ	Teplotní spád ($K m^{-1}$)
θ	Teplotu ($^{\circ}C$)
t	Čas (s)
x,y,z	Souřadné osy trojrozměrného prostoru
A	Součinitel teplotní vodivosti (m^2s^{-1})
λ	Součinitel tepelné vodivosti ($W m^{-1}K^{-1}$)
q_c	Hustota tepelného toku při proudění ($W m^{-2}$)
θ_{si}	Teplota vnitřního povrchu konstrukce ($^{\circ}C$).
Φ_{se}	Celkový sálavý tepelný tok (W)
T	Absolutní teplota tělesa (K).
R	Tepelný odpor konstrukce ($m^2 K W^{-1}$).
A	Plocha (m^2)
t_1, t_2	Povrchové teploty materiálu nebo stěny ($^{\circ}C$)
d	Tloušťka materiálu nebo konstrukce v (m)
λ	Součinitel tepelné vodivosti ($W.m^{-1}.K^{-1}$)
K	Tepelná kapacita měřícího válečku ($J.K^{-1}$)
S	Plocha vzorku (m^2)
δ	Tloušťka vzorku (m)
B	Koeficient tepelných ztrát ($J.s^{-1}.K^{-1}$)
α	Koeficient přestupu tepla ($W.m^{-2}.K^{-1}$)
$a_{1,2,3}$	Parametry nelineární regrese (s^{-1})
τ	Čas (s)

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 1. Tkanina z kombinace bílých a černých uhlíkových vláken [1].....</i>	<i>11</i>
<i>Obr. 2. Deformace části kompozitu tahovým napětím [2].....</i>	<i>13</i>
<i>Obr. 3. Bavlněná vlákna 300x zvětšená [2].....</i>	<i>14</i>
<i>Obr. 4. Schéma výroby skleněných vláken [2].....</i>	<i>15</i>
<i>Obr. 5. Řez borovým vláknem [2].....</i>	<i>18</i>
<i>Obr. 6. Řezání prepregu plotrem [3].....</i>	<i>20</i>
<i>Obr. 7. Prepreg skelých vláken [4].....</i>	<i>21</i>
<i>Obr. 8. Základní typy tkanin používaných jako výztuže [5].....</i>	<i>22</i>
<i>Obr. 9. Pletená výztuž [5].....</i>	<i>23</i>
<i>Obr. 10. Rovinky a prepregy [6].....</i>	<i>24</i>
<i>Obr. 11. Forma pro ruční výrobu kompozitu [2].....</i>	<i>25</i>
<i>Obr. 12. Schéma zpracování v autoklávu [7].....</i>	<i>26</i>
<i>Obr. 13. Forma pro axiální navíjení vláken [8].....</i>	<i>27</i>
<i>Obr. 14. Schéma výroby pultruzí [9].....</i>	<i>27</i>
<i>Obr. 15. Výroba kajaku technologií Vacuum bag moulding [10].....</i>	<i>28</i>
<i>Obr. 16. Schéma zpracování trubky metodou Pressure bag moulding [11].....</i>	<i>29</i>
<i>Obr. 17. Celokompozitní trub dopravního letadla [3].....</i>	<i>30</i>
<i>Obr. 18. Motor Škody Fabie S 2000 s karbonovým krytem [12].....</i>	<i>30</i>
<i>Obr. 19. Detail motoru Škody Fabie S 2000 [13].....</i>	<i>31</i>
<i>Obr. 20. Supersportovní automobil Koenigsegg ccx s karoserií z uhlíkových.....</i>	<i>31</i>
<i>Obr. 21. Letadlová loď US Army s kompozitním pláštěm pro snížení intenzity odražených radarových vln [15].....</i>	<i>32</i>
<i>Obr. 22. Nástřík kompozitu na formu pro výrobu jachet [16].....</i>	<i>32</i>
<i>Obr. 23. Protéza z uhlíkových vláken [17].....</i>	<i>33</i>
<i>Obr. 24. Detail protézy, ve které je tlumící prvek z uhlíkových vláken [17].....</i>	<i>33</i>
<i>Obr. 25. Kompozitní umělá céva [18].....</i>	<i>34</i>
<i>Obr. 26. Kompozitní dřík kloubní náhrady [19].....</i>	<i>35</i>
<i>Obr. 27. Vodič v kompozitním izolantu a další kompozitní izolanty [20].....</i>	<i>35</i>
<i>Obr. 28. Rošty, poklopy a žebříky z nevodivého kompozitu [21].....</i>	<i>36</i>
<i>Obr. 29. Kompozitní izolant vysokého vedení [22].....</i>	<i>36</i>
<i>Obr. 30. Rám Duratec vyrobený technologií mechanického spojování kompozitu s duralem [23].....</i>	<i>38</i>

<i>Obr. 31. Monocoque říditka silničního kola [24].....</i>	<i>39</i>
<i>Obr. 32. Část rámu silničního kola vyrobeného technologií monocoque [25]</i>	<i>39</i>
<i>Obr. 33. Stíhací letoun stealth F117 US Army s kompozitním pláštěm [26].....</i>	<i>40</i>
<i>Obr. 34. Regata švédské armády s technologií stealth [27]</i>	<i>41</i>
<i>Obr. 35. Neprůstřelná vesta pro skryté nošení [28]</i>	<i>42</i>
<i>Obr. 36. Chování neprůstřelné vesty při zásahu [29]</i>	<i>43</i>
<i>Obr. 37. Helma příslušníka US Army po zásahu projektilem [30].....</i>	<i>44</i>
<i>Obr. 38. Fotbalový stadion Allianz arena v Mnichově [31].....</i>	<i>45</i>
<i>Obr. 39. Kompozitní profil [32].....</i>	<i>45</i>
<i>Obr. 40. Rostoucí uhlíkové nanotrubičky [33]</i>	<i>47</i>
<i>Obr. 41. Model rozložení uhlíkových atomů v nanotrubičce [33]</i>	<i>47</i>
<i>Obr. 42 Schéma konstrukce pro odvození tepelného odporu [34]</i>	<i>50</i>
<i>Obr. 43 Zobrazení vláken vybraných vzorků vytržených z matrice při destrukci materiálu (Nahoře zobrazení metalografickým mikroskopem a dole klasickým)</i>	<i>56</i>
<i>Obr. 44. Schéma měřícího přístroje.....</i>	<i>57</i>
<i>Obr. 45. Pracovní prostředí modulu Control Web 2000</i>	<i>58</i>
<i>Obr. 46. Zobrazení naměřených dat v programu NeReg02.....</i>	<i>59</i>
<i>Obr. 47. Okno výpočtů programu NeReg02</i>	<i>59</i>
<i>Obr. 48. Teplotní křivka chlazení vzorku vytvořená programem NeReg02.....</i>	<i>60</i>
<i>Obr. 49. Závislost reziduálního rozptylu na teplotě</i>	<i>60</i>
<i>Obr. 50 Výpočtové okno programu NeReg02</i>	<i>63</i>

SEZNAM TABULEK

<i>Tab. 1. Tabulka vlastností materiálů</i>	55
<i>Tab. 2. Tabulka naměřených hodnot tepelné vodivosti</i>	64
<i>Tab. 3. Tabulka vypočtených hodnot tepelných odporů</i>	64