

POLYMERNÍ KOMPOZITNÍ MATERIÁLY V ELEKTROTECHNICKÉ PRAXI

Bc. Zdeněk Polášek

Diplomová práce
2013



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav výrobního inženýrství

akademický rok: 2012/2013

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Zdeněk Polášek**

Osobní číslo: **T11179**

Studijní program: **N3909 Procesní inženýrství**

Studijní obor: **Výrobní inženýrství**

Forma studia: **prezenční**

Téma práce: **Polymerní kompozitní materiály v elektrotechnice**

Zásady pro vypracování:

I. Teoretická část

1. Možnosti uplatnění polymerních kompozitních materiálů v elektrotechnickém průmyslu (obaly, kryty)

2. Elektrické a tepelné vlastnosti kompozitních materiálů.

3. Přehled požadavků na materiály v elektrotechnickém průmyslu.

II. Experimentální část:

1. Výroba zkušebních vzorků, zejména s uhlíkovou výtuzí.

2. Experimentální studium elektrických vlastností navržených polymerních kompozitních systémů v závislosti na objemovém zastoupení uhlíku.

3. Experimentální studium tepelných vlastností navržených polymerních kompozitních systémů v závislosti na objemovém zastoupení uhlíku.

4. Vyhodnocení dosažených výsledků a shrnutí studované problematiky.

Rozsah diplomové práce:

Rozsah příloh:

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

Seznam odborné literatury:

Ehrenstein, G. W.: Polymerní kompozitní materiály. Scientia Praha, 2009.

Jančár, J.: Úvod do materiálového inženýrství kompozitů. Brno, 1999.

Dadourek, K.: Kompozitní materiály – druhy a jejich použití. Liberec, 2007.

Harper CH. A.: Handbook of plastics, elastomers, and composites. McGraHill, 1996.

CHUNG, Deborah D. L. Composite Materials: Science and Applications. Springer, 2010.

Vedoucí diplomové práce: **doc. Ing. Soňa Rusnáková, Ph.D.**
Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání diplomové práce: **8. února 2013**

Termín odevzdání diplomové práce: **10. května 2013**

Ve Zlíně dne 11. února 2013


doc. Ing. Roman Čermák, Ph.D.
děkan




prof. Ing. Berenika Hausnerová, Ph.D.
ředitel ústavu

Příjmení a jméno: POLÁŠEK Zdeněk

Obor: Výrobní inženýrství

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, považuji 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 1.4.2013


.....

²⁾ 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 nevydávalečně 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 teč nejmně pět pracovních dnů před konáním obhajoby zveřejněny k nahližení 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). Odpirá-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 jim 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.

ABSTRAKT

Diplomová práce se zabývá studiem kompozitních materiálů při vedení tepla, elektrického proudu a mechanickými vlastnostmi, které hrají důležitou roli při aplikaci. K experimentu byl použit jeden typ uhlíkového prepregu M49 s epoxidovou pryskyřicí. Na tomto materiálu je zkoumána tepelná vodivost, elektrické vlastnosti a ohybové vlastnosti v závislosti na tloušťce. Práce popisuje postup výroby vzorků, měření jednotlivých zkoušek a ekonomické zhodnocení.

Klíčová slova: prepreg, uhlíkové vlákno, epoxidová pryskyřice, tepelná vodivost, elektrická vodivost, modul pružnosti v ohybu

ABSTRACT

This thesis deals with the study of composite materials, the conduction of heat, electricity and mechanical properties, which play an important role in the application. The experiment was used one type of carbon prepreg M49 with an epoxy resin. In this paper is investigated thermal conductivity, electrical characteristics and bending characteristics depending on the thickness. The work describes a process for the production of samples, measurement of individual tests and economic evaluation.

Keywords: prepreg, carbon fiber, epoxy resin, thermal conductivity, electrical conductivity, flexural modulus

Poděkování:

Tímto chci poděkovat vedoucí práce, paní doc. Ing. Soni Rusnákové, Ph.D. za odborné vedení a poskytnuté rady při zpracování diplomové práce.

Dále bych rád poděkoval za rady a věnovaný čas panu Ing. Milanovi Žaludkovi a panu Ing. Ladislavu Fojtlovi za rady a čas věnovaný při řešení.

Práce vznikla s podporou grantových úloh VEGA No. 1/0356/13 a APVV SK-CZ-168-11 a ve spolupráci s pracovištěm FMMI VSB-TU Ostrava.

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

OBSAH

ÚVOD	10
I TEORETICKÁ ČÁST	11
1 KOMPOZITY	12
1.1 VÝZTUŽE V KOMPOZITECH.....	13
1.1.1 Skleněná vlákna	15
1.1.2 Polymerní vlákna	15
1.1.3 Bórová vlákna	16
1.1.4 Keramická vlákna.....	16
1.1.5 Přírodní vlákna	16
1.1.6 Kovová vlákna	17
1.1.7 Čedičová vlákna	17
1.1.8 Uhlíková vlákna	17
1.2 MATRICE	19
1.2.1 Polymerní matrice	20
1.2.1.1 Epoxidové pryskyřice	22
1.2.2 Kovová matrice	23
1.2.3 Uhlíková matrice	26
1.2.4 Keramická matrice	27
1.3 PREPREGY	28
2 TEPelnÉ VLASTNOSTI	30
2.1 TEPelnÁ VODIVOST	30
2.2 MATEMATICKÝ MODEL VÝPOČTU TEPelnÉ VODIVOSTI KOMPOZITU.....	31
2.3 TEPelnÝ ODPOR.....	32
2.4 ZPŮSOBY MĚŘENÍ TEPelnÉ VODIVOSTI	32
3 KOMPOZIT A JEHO ELEKTRICKÉ VLASTNOSTI	35
3.1 ELEKTRICKÁ VODIVOST POLYMERNÍCH KOMPOZITŮ	35
3.2 PERKOLAČNÍ TEORIE	35
3.2.1 Vlastnosti kompozitu nad prahem perkolace	37
3.2.2 Vlastnosti kompozitu na prahu perkolace	38
3.2.3 Vlastnosti kompozitu pod prahem perkolace	38
4 APLIKACE MATERIÁLŮ V ELEKTROTECHNICKÉ PRAXI	39
4.1 ZÁSADY PŘI KONSTRUKCI S OHLEDEM NA GENEROVÁNÍ TEPLA	42
II PRAKTICKÁ ČÁST	44
5 STANOVENÍ CÍLŮ DIPLOMOVÉ PRÁCE	45
6 CHARAKTERISTIKA POUŽITÉHO MATERIÁLU	46
6.1 MIKROSKOPICKÉ ZKOUMÁNÍ VZORKU	49
7 MĚŘENÍ ELEKTRICKÝCH A DIELEKTRICKÝCH VLASTNOSTÍ	52
7.1 POPIS MĚŘENÍ ELEKTRICKÝCH A DIELEKTRICKÝCH VLASTNOSTÍ.....	59
8 MĚŘENÍ TEPelnÉ VODIVOSTI	64
9 MĚŘENÍ MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ OHYBEM	68

9.1	STATISTICKÉ VYHODNOCENÍ	69
9.2	HODNOTY MĚŘENÍ ZKOUŠKY OHYBEM	69
10	EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ	82
	ZÁVĚR	85
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	87
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	90
	SEZNAM OBRÁZKŮ	93
	SEZNAM TABULEK.....	97
	SEZNAM PŘÍLOH.....	98

ÚVOD

Deset až patnáct let vláknové materiály byly výsadou nejvyšších aplikací, jako například v letectví a kosmonautice, Formule 1 nebo v závodním segmentu, ale dnes aplikace míří do segmentů nám velice známých. Navzdory tomu, že aplikace vláknových kompozitů jsou realizovány především u specializovaných aplikací v malém objemu oproti celkovému trhu, tak jsem přesvědčen o růstu aplikací vysokopevnostních kompozitů v následujících letech - především vzhledem k jejich potenciálu v oblasti lehké konstrukce.

V každém odvětví by se dal zmínit obrovský význam energie a efektivního využívání zdrojů přinášející lehké produkty. Tradiční materiály elektrotechnice, jako je hliník, polykarbonát, polyvinylchlorid, akrylonitrilbutadienstyren a hořčikové slitiny, mohou nahradit vláknové kompozity, které vykazují podstatně větší potenciálu v určitých aplikacích. Toto platí zejména pro komponenty, pro které i pevnost a tuhost jsou zásadní pro jejich konstrukci. Při použití dosáhneme zmenšení hmotnosti krytu za stejných nebo lepších mechanických vlastností. Díky přítomnosti uhlíkových vláken očekáváme lepší odvod tepla jako u polymerů.

Nicméně širší využití vysoce pevných vyztužených plastů v různých oblastech použití rovněž vyvolává zajímavé otázky z hlediska technologie výroby. Jedná se o velikosti objemu série, vhodnost ručních postupů výroby do budoucnosti, tvar výrobku pro sériovou výrobu a začlenění se průmyslu do dalšího rozvoje.

Značné mediální pozornosti si například získalo BMW při projektu, ve kterém první aplikuje ve středně velké sérii několika desítek tisíc automobilů díly z uhlíkového vlákna vyztuženého polymerem – CFRP v roce 2013. Mezi další veřejně známé projekty patří výstavba nových letadel A350 a B787. Obě mají více než 50 % struktury vyrobené z uhlíkového vlákna vyztuženého polymerem – CFRP.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 KOMPOZITY

Kompozitní materiály jsou vícefázové materiály získané prostřednictvím umělé kombinace různých materiálů s cílem dosáhnout vlastností, které jednotlivé komponenty samy o sobě nemohou dosáhnout. Tyto materiály jsou odlišovány od slitin, které obsahují několik složek tvořené prostřednictvím procesů, jako je lití. Vlastnosti přizpůsobujeme s ohledem na aplikaci materiálu, aby splňovaly potřeby leteckého, automobilového, elektrotechnického a stavebního průmyslu. V důsledku úspory hmotnosti oproti kovům kompozitní materiály představují většinou konstrukční pro komerční využití, ale při aplikaci musíme počítat s vyšší výrobní cenou.

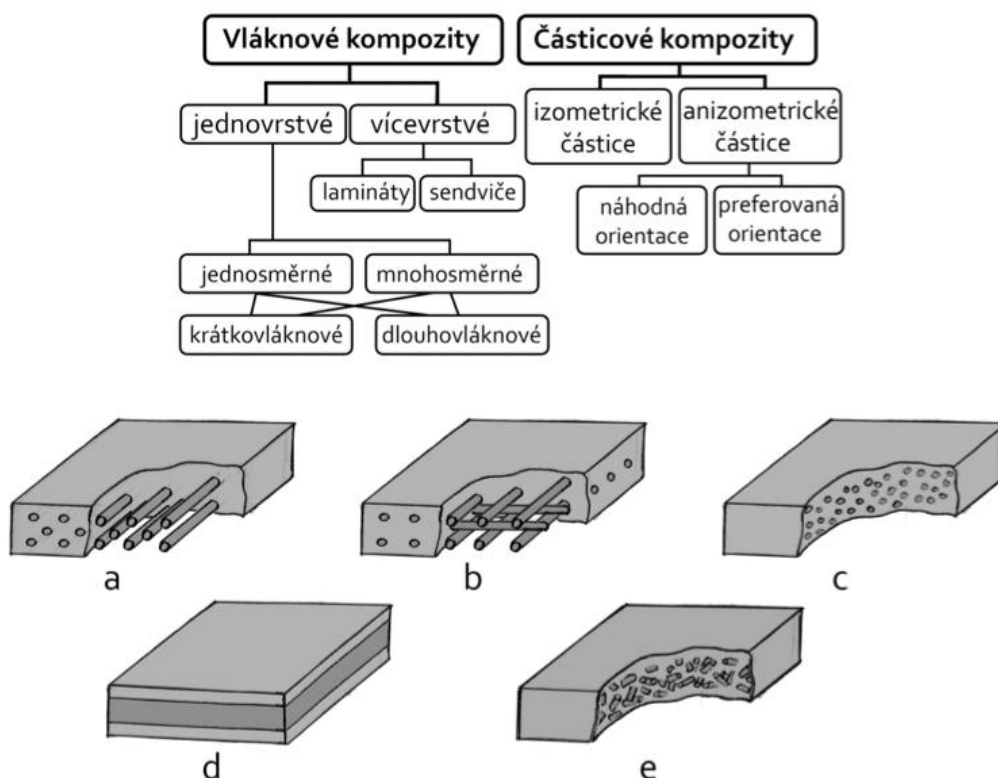
Příklad z kompozitního materiálu je lehký konstrukční kompozitní, který se získá vložením kontinuální uhlíkové vlákna v jednom nebo více směrech do polymerní matrice. Vlákna poskytují pevnost a tuhost, zatímco polymer slouží jako pojivo. Zejména z uhlíkových vláken polymeru matricí mají následující atraktivní vlastnosti: [1]

- nízká hustota (nižší než hliník)
- vysoká pevnost (pevný, jak vysokopevnostní oceli)
- vysoká tuhost (tužší než titan, ale mnohem nižší hustoty)
- dobrá odolnost proti únavě
- dobrá odolnost proti tečení
- nízký koeficient tření a dobrou odolnost proti opotřebení
- chemická odolnost (chemická odolnost ovlivněna polymerní matricí)
- odolnost proti korozi
- rozměrová stabilita
- tlumení vibrací schopnost
- Malý elektrický odpor
- Vysoká tepelná vodivost

Nejvýznamnější předností kompozitů je charakteristický tzv. synergismus, což znamená, že vlastnosti kompozitu jsou vyšší, než by odpovídalo pouhému poměrnému sečtení vlast-

ností jednotlivých složek. Existence synergismu je velmi významná, neboť vede k získávání materiálů kvalitativně zcela nových vlastností [2].

Obecně platí, že kompozity jsou rozděleny podle matricového materiálu. Hlavní třídy kompozitů jsou polymerní matrice, cementová matrice, kovová matrice, uhlíková matrice a keramická matrice.



Obr. 1 Rozdělení kompozitů podle geometrie a orientace plniva a struktur: a) jednosměrně orientovaný dlouhovláknový kompozit, b) kompozit s dvousměrnou výztuží (tkanina), c) částicový kompozit, d) vrstvený (sendvičový) kompozit, e) krátkovláknový kompozit s náhodně orientovanými vlákny. [2]

1.1 Výztuže v kompozitech

Úkolem výztuže (plniva) v kompozitním materiálu je především zajistit mechanické vlastnosti materiálu, jako je pevnost a tuhost. Avšak i elektrické vlastnosti závisí na výztuži, a proto typ výztuže má klíčový vliv na vlastnosti profilu [2,3].

Podle geometrického tvaru a uspořádání výztuže dělíme kompozity následujícím způsobem obr. 1.



Obr. 2. Kompozit podle tvaru a uspořádání výztuže [1]

Částicové výztuže

Nemají žádné dlouhé rozměry a jako nevláknitý útvar udáváme jejich rozměr v průměru. U výztužných částic pak rozlišujeme tvar kulovitý, destičkovitý, tyčinkovitý a nepravidelný. Částicové výztuže se dále dělí na izometrické, které mají tvar koule nebo elipsoidu a anizometrické, které mají tvar destiček nebo jehlic. Částicové výztuže mají vlastnosti nezávislé na směru.

Zvýšení tuhosti a zlepšení tvarové stálosti se dosahuje použitím anorganických částic. Elastomerní částice v kompozitu zlepšují jeho houževnatost. Částice sulfidu a grafitu zvyšují odolnost proti otěru a zlepšují kluzné vlastnosti. V částicových kompozitech jsou využívány keramické kovové anorganické výztuže [4,5].

Vláknové výztuže

Jeden rozměr vláknové výztuže je výrazně větší než dva zbývající. Vláknová výztuže rozhodují o tahové, tvarové a ohybové pevnosti kompozitu. Tyto vlastnosti ovlivňuje materiál vláken, jejich množství obsažené v matrici a jejich orientace. Orientací vláken lze optimalizovat pevnost a tuhost, odolnost proti únavě, teplotě a vlhkosti. Pevnost a tuhost konkrétního materiálu se významně mění podle směru uložení vláken. Nejvyšší pevnost je ve směru vláken a podstatně horší pevnosti je dosaženo ve směrech mimo orientaci vláken [2].

Vláknové výztuže mohou být dlouhé, nepřerušované po celé délce výrobku nebo krátké. Vláknová výztuže mohou být uspořádána v jednom směru, ve dvou směrech nebo chaoticky obr. 2. [2,4]



Obr. 3. Typy vláknových výztuží [6]

Dle použité délky vláken se často rozdělují na materiály vyztužené krátkými vlákny – krátkovláknové (poměr mezi délkou L a minimálním průměrem D plniva L/D je menší než 1000) a materiály vyztužené dlouhými vlákny - dlouhovláknové (L/D je větší než 1000).

Průřez vláken je zpravidla kruhový, jejich průměr se pohybuje v širokém rozmezí tj: [6]

Do průřezu 100 nanometrů – nanovlákná

0,1 až 1 mikrometrů – mikrovlákná např whiskery

1 až 10 mikrometrů – střední vlákna – uhlíková, skleněná, textilní

Nad 10 mikrometrů – hrubá vlákna – B, TiB_2 , SiC [2,4,6]

Podle použitého materiálu se vláknové výztuže dělí:

1.1.1 Skleněná vlákna

Jsou amorfní a vyrábějí se tažením z taveniny. Tato vlákna mají průměr nejčastěji od 3,5 do 20 μm . Potřebného průměru vláken se dosáhne dloužením proudu skla vytékajícího z platinových trysek (průměr trysek je 1 – 2 mm). Vytažená vlákna se sdružují do pramene a navíjí se na buben. Před navinutím na buben se musí ještě za horka vlákno opatřit tenkým ochranným povlakem, protože vlákna jsou velmi abrazivní a lámavá. Jako povlak se používají lubrikační vosky nebo vazebné prostředky. Předností skelných vláken je především nízká cena. Skelná vlákna mají lepší houževnatost než uhlíkové vlákna. [2,6,7]

1.1.2 Polymerní vlákna

Využívají se především díky své malé hustotě. Vysoké tuhosti a pevnosti vlákna je dosaženo téměř dokonalou orientací tuhých lineárních makromolekul v podélném směru vlákna.

Polymerní vlákna nejsou křehká, při kolmém působení tlakové síly na vlákno dojde k plastickému přetvoření. [7,15]

Vlákna z polyamidů – aramidů, pod obchodním názvem Kevlar a Nomex, byly vyvinuty společností DuPont. Aramidová vlákna se používají ve formě rovingu nebo tkanin a to samostatně nebo jako hybridní v kombinaci se skleněnými nebo uhlíkovými vlákny. Oproti skleněným vláknům jsou aramidy výrazně lehčí. Mají rovněž dvojnásobně větší modul a vynikající schopnost absorbovat energii. Kevlar je odolný plamenu, je samozhášivý a netaví se. Velmi dobře tlumí vibrace a má dobrou rázovou houževnatost. Tkanina z aramidových vláken se proto používá na neprůstřelné vesty, ochranné kalhoty dělníků, sportovní pomůcky, náhražky azbestu a jako pletenina pro ochranné rukavice. [7,9,10]

1.1.3 Bórová vlákna

Tato vlákna mají oproti ostatním vláknům velký průměr (102 μm) a mají větší tvarovou stabilitu při tlakovém namáhání. Jejich pevnost v tlaku je větší než pevnost v tahu. Kompozit s bórovými vlákny je dražší než s vlákny uhlíku, ale má lepší mechanické vlastnosti. Hlavní oblastí aplikace je zpevnění konců tlakem namáhaných prvků, výroba dílů s velmi malou tepelnou roztažností. [2,7,9]

1.1.4 Keramická vlákna

Jejich hlavní předností je jejich výborná tepelná a velmi dobrá chemická odolnost. Kontinuální vlákna karbidu křemíku (SiC) jsou relativně levná, protože výchozí suroviny jsou dostupné ve větším množství. Jsou zatím používána pouze uhlíkovými, kovovými nebo keramickými matricemi pro letecký průmysl a pro výrobky pracující za vysokých teplot. Kontinuální vlákna oxidu hlinitého (Al_2O_3) nacházejí podobné využití jako vlákna karbidu křemíku. Od SiC vláken se však liší svojí elektrickou nevodivostí, což jim umožňuje využití například v kompozitech pro kryty radarů. Vlákna SiC a Al_2O_3 mají větší tuhost než skleněná a polymerní vlákna. [2,7,9,10]

1.1.5 Přírodní vlákna

Jsou to vlákna z obnovitelných zdrojů, zejména na bázi celulózy – sisal, len, konopí, bavlna, juta nalézají uplatnění jako levnější alternativa skleněných vláken. V poslední době jsou stále více využívána při výrobě pevnostně méně náročných a zároveň lehkých dílců v interiérech automobilů a jiných dopravních prostředků. Při používání rostlinných vláken

dochází k úspoře polymeru, odpad je možné recyklovat, mají přírodní vzhled povrchu a je možný rychlejší výrobní postup díky větší tepelné vodivosti. Používají se ve formě pramenců a nití, netkaných materiálů – rohoží nebo tkanin. [1,7,10]

1.1.6 Kovová vlákna

Vyrábějí se z ušlechtilého materiálu, jako jsou korozivzdorné a žáruvzdorné oceli a slitiny na bázi niklu. Použití nacházejí ve formě vodivých tkanin, jako filtrační média pro agresivní látky a vysoké teploty, tepelné štíty a k plnění elektricky vodivých plastů a kompozitů. [1,3,7]

1.1.7 Čedičová vlákna

Vlastnostmi se čedičová vlákna výrazně podobají skleněným vláknům typu S. Výroba těchto vláken se rozšířila teprve nedávno, jedná se o nový typ technického vlákna. Tato vlákna mají vysokou pevnost, nízkou tažnost. Vlákna jsou nehořlavá, nenasákavá, mají nízkou tepelnou vodivost, vysoký elektrický odpor, dobrou tepelnou odolnost. Výhodou je také jejich cena, která činí asi 60 % ceny skleněných S vláken. Jednou z negativních vlastností těchto vláken je jejich křehkost. Technologie používaná na výrobu čedičových vláken je obdobná jako technologie na výrobu vláken skleněných. Čedičová vlákna nacházejí uplatnění ve stavebnictví v podobě tepelně a zvukově izolačních desek, příček, stropů, sendvičového obvodového zdiva, podlah a v různých technických výrobcích jako rozbrusovací kotouče, lamináty, brzdové destičky. [1,6,7]

1.1.8 Uhlíková vlákna

Uhlíková vlákna mají nejširší spektrum mechanických vlastností polymerních kompozitů a to při malé hustotě ($1,8 - 2 \text{ g/cm}^3$). Vynikající mechanické vlastnosti uhlíkových vláken vyplývají vysoce anizotropní hexagonální struktury, kterou se vyznačuje grafit. V bazálních hexagonálních rovinách grafitu jsou uhlíkové atomy mezi sebou vázány silnými kovalentními vazbami, zatímco mezi těmito rovinami působí slabé Van der Waalsovy síly. [4]

V uhlíkových vláknech jsou hexagonální roviny uhlíkových atomů dokonale orientovány ve směru osy vlákna, jejich vzájemné uspořádání vedle sebe však není tak pravidelné jako v hexagonálních krystalech grafitu. Vlastnosti uhlíkových vláken jsou závislé na míře orientace hexagonálních rovin do směru osy vlákna a míře uspořádání hexagonálních rovin

mezi sebou. Struktura a vlastnosti uhlíkových vláken jsou dány technologií jejich výroby. [10,11].

Vlastnosti uhlíkových vláken, které upřednostňujeme:

- Vysoká pevnost v poměru k hmotnosti
- Dobrá tuhost
- Odolný proti korozi
- Elektricky vodivý
- Odolnost vůči únavě
- Dobrá pevnost v tahu, ale křehký
- Požární odolnost / není hořlavý
- Vysoká tepelná vodivost v některých formách
- Nízký koeficient tepelné roztažnosti
- Není jedovatý
- Propouští rentgenové záření
- Vynikající EMI (elektromagnetické rušení) stínící vlastnosti

Vysoká pevnost v poměru k hmotnosti:

Schopnost materiálu odolávat síle, která působí na jednotku plochy pro porušení. Mezi materiály, které mají vysoký poměr síly k hmotnosti, můžeme zařadit hliník, titan, hořčík, uhlíkové a skleněné vlákna. Překvapivá je také balza, která se může pyšnit svou vysokou pevností. [3,12]

V následující tabulce jsou materiály vybrány pouze pro srovnání. Mohou se lišit v závislosti na složení, typu slitiny a hustotou dřeva.

Tab. 1: Pevnostní poměry jednotlivých materiálů

Materiál	Poměr síly k hmotnosti kN.m / kg
Kevlar	2514
Uhlíkové vlákno	2457
Skleněné vlákno	1307
Pavoučí vlákno	1069

Uhlíkové vlákno s epoxidovou maticí	785
Balsa (osové zatížení)	521
Ocelové slitiny	254
Hliníkové slitiny	222
Polypropylen	89
Dub	87
Nylon	69

Rozdělení uhlíkových vláken:

- *Uhlíková vlákna s nižšími parametry mechanických vlastností*

Pro tato vlákna je charakteristická pevnost v tahu nižší než 1000 MPa a modul pružnosti v tahu nižší než 100 GPa. Jsou vyráběny ve formě vláken, textilií a plstí. Využívají se jako tepelná izolace, výztuž do betonu nebo také k elektromagnetickému stínění. Pokud hovoříme o uhlíkových vláknech, jedná se o ty s vysokými mechanickými parametry [12,13,14].

- *Uhlíková vlákna s vysokými parametry mechanických vlastností*

Pro tyto vlákna je hodnota pevnosti v tahu 3,5 - 7 GPa a modul pružnosti v tahu 230 - 930 GPa. Patří zde vlákna na bázi PAN (polyakrylonitrilu), u kterých dosahujeme vysokých pevností.[14]. Podle mechanických vlastností je dělíme:

- vysoce pevná vlákna (high tensile – HT fibers)
- pevnost v tahu 3 - 4 GPa, modul pružnosti 230-300 GPa vysokomodulová (high modulus - HM)
- pevnost v tahu 2,5 - 4 GPa, modul pružnosti nad 400 GPa
- středně modulová vlákna (intermediate modulus – IM fibers)
- vlákna s vysokým modulem (ultrahigh modulus – UHM fibers) pevnost v tahu 2,5 - 4 GPa, modul pružnosti na 500 GPa [11,14]

1.2 Matrice

Pojem matrice se rozumí materiál, který je prosycen systém vláken, že po zpracování vznikne tvarově stálý výrobek. Tato surovina se označuje jako kompozit. Úlohou matrice v

kompozitním profilu je jak spojovat výztuže dohromady, tak chránit výztuž před mechanickým nebo chemickým poškozením: [9,15]

- přenos napětí namáhání na vlákna
- převedení namáhání z vlákna na vlákno
- zajištění geometrické polohy vláken a tvarové stálosti výrobku
- ochrana vlákna před vlivy okolí

Druh matrice určuje také další vlastnosti, jako je odolnost proti korozi, elektricko-izolační vlastnosti, tepelnou vodivost a odolnost proti teplotě. [12,15].

Podle druhu matrice dělíme kompozity do pěti následujících skupin:

- s polymerní matricí (polymer matrix composites – PMCs),
- s kovovou matricí (metal matrix composites – MMCs),
- s keramickou matricí (ceramic matrix composites – CMCs), také se skleněnou matricí,
- s uhlíkovou matricí.

Tab. 2 Typy kompozitních materiálů

Matrice	Výztužný materiál			
	Polymer	Kov	Keramika	Uhlík
Polymer	✓	✓	✓	✓
Kov	✓	✓	✓	✓
Keramika	✓	✓	✓	✓
Uhlík		✓	✓	✓

1.2.1 Polymerní matrice

Polymerní matrice jsou obecně poměrně slabé, viskoelastické materiály o velmi nízké tepelné a elektrické vodivosti. Pevnost a tuhost PMC pocházejí převážně z výztuží vláken. Dělí se na reaktoplasty a termoplasty. Reaktoplastické matrice jsou v dnešní době daleko běžnější než termoplastové matrice, ale v poslední době dochází k rozvoji. Výhody termo-

plastické matrice ve srovnání s reaktoplastovou matricí zahrnují následující vlastnosti: [13,16]

Nižší výrobní náklady:

- Neomezená trvanlivost
- Změna tvaru (pro opravy a recyklace)
- Menší zdravotní rizika v důsledku chemických látek při zpracování
- Nízký obsah vlhkosti
- Tepelně tvarovatelný
- Svařitelnost a lepení

Vláknité kompozity s polymerní matricí mohou být klasifikovány podle toho, zda jsou vlákna krátké nebo kontinuální. Kontinuální vlákna mají mnohem větší vliv, než krátké vlákna na mechanické vlastnosti, elektrický odpor, tepelná vodivost.

Jsou mnohem jednodušší na výrobu než kovové matice, uhlíkové matice, a keramická matice. To je z důvodu relativně nízké zpracování teploty. Pro termosety, jako je například epoxid, fenolových a furfurylalkoholem pryskyřic, se teplota zpracování obvykle pohybuje v rozmezí od teploty místnosti asi do 200 °C, pro termoplastické polymery, jako je například polyimid (PI), polyethersulfon (PES), polyetheretherketon (PEEK), polyetherimid (PEI), je teplota zpracování obvykle v rozmezí 300 až 400 °C. [12,14]

Termosety (zejména epoxidové) se již dlouho používá jako polymerní matrice pro uhlíková vlákna. Během vytvrzování, obvykle provádí za přítomnosti tepla a tlaku, termosetu pryskyřice ztvrdne postupně z důvodu dokončení zesílení molekul polymeru.

Termoplasty, kterými jsou například polystyren (PS), polypropylen (PP), polyetylen tereftalát (PET) a další, jsou tuhé látky, které měknou a tečou při zvýšení teploty. Po ochlazení opět přejdou do pevného skupenství.

Reaktoplasty, jakými jsou například epoxidy, nenasycené polyestery či fenol formaldehyd, jsou obvykle dodávány ve formě viskózních tekutin s konzistencí řídkého roztoku tvořeného relativně malými molekulami, které jsou vytvrzeny chemickou reakcí po dodání katalyzátoru a iniciátoru. Vytvrzení probíhá buď za pokojové teploty, nebo za zvýšené

teploty. Vytvrzený reaktoplast zůstává v tuhé fázi i po zahřátí, což zvyšuje jeho odolnost proti vysokým teplotám, i když to na druhé straně zvyšuje i jeho křehkost a omezuje recyklovatelnost.

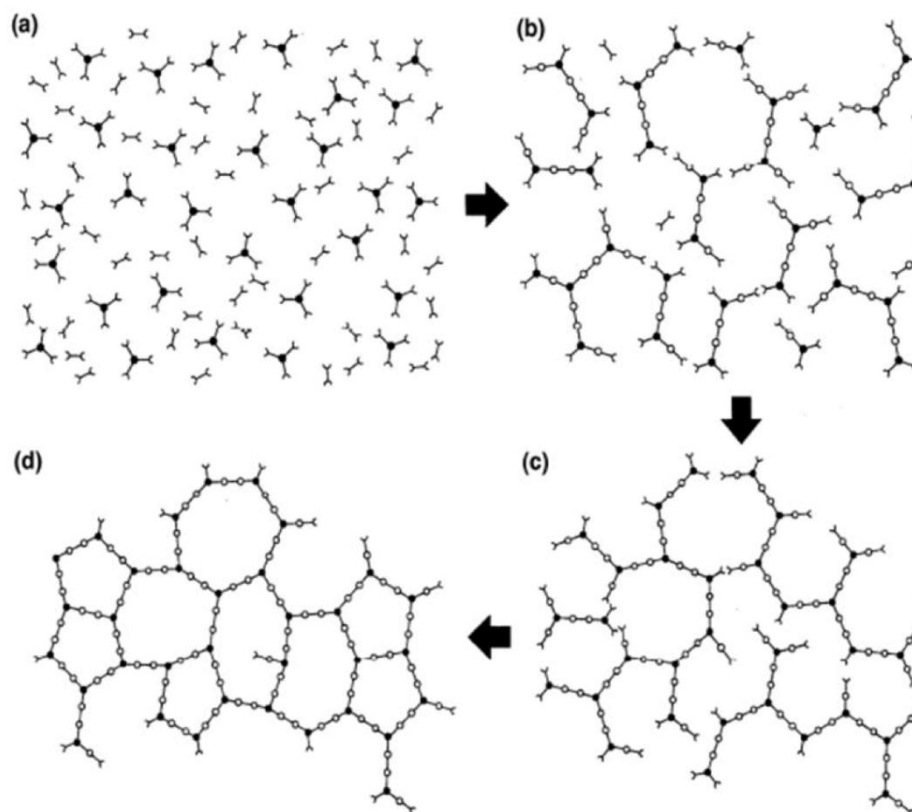
Kvůli snaze o recyklovatelnost materiálu kompozitních dílů vyráběných ve velkých sériích vede k nahrazování reaktoplastů termoplasty.

Vzhledem k nízké ceně výroby se polymerní matrice používají pro lehké konstrukce (letadla, sportovních potřeb, dílů kol, atd.). Kromě toho má dobré tlumení vibrací.

1.2.1.1 Epoxidové pryskyřice

Názvem epoxidové pryskyřice se označují pryskyřičné látky, jejichž řetězce obsahují zpravidla více než jednu epoxidovou skupinu. Na jejich značné reaktivitě s velkým počtem sloučenin, vedoucí k zesíťovaným makromolekulárním produktům, a na jejich vynikajících vlastnostech, zejména k velké adhezi k většině ostatních materiálu, chemické odolnosti i minimálnímu smrštění při vytvrzování, bylo založeno velmi rychlé rozšíření výroby před více než půlstoletím [6].

Epoxidové pryskyřice jsou bezbarvé, nažloutlé hmoty, které mají konzistenci kapalin. Za běžných podmínek jsou prakticky neomezeně skladovatelné. Nízkomolekulární typy jsou rozpustné v aromatických uhlovodících a vysokomolekulární hlavně v ketonech a v esterech. EP odolávají velmi dobře zásadám i zředěným roztokům anorganických a organických kyselin. Jejich chemická odolnost stoupá s molekulovou hmotností a stupněm zesíťování. Značný vliv má i druh tvrdidla. Při procesu síťování dochází ke zvyšování viskozity vlivem nárůstu molekulární hmotnosti. Nezvratný přechod z tekutého do gelového stavu se nazývá bod gelace. Proces vytvrzení je znázorněn na obr. 4. [7,17,18].



Obr. 4 Zjednodušené schéma procesu vytvrzení reaktoplastu. (a) Monomery a oligomery. (b) Proces růstu a větvení při zvyšování viskozity. (c) Gelový stav za nevratným bodem gelace. (d) Plně vytvrzený reaktoplast. [8]

Epoxidy jsou nejvšestrannější reaktoplasty pro konstrukční použití. Mají dobrou houževnatost (v porovnání s ostatními reaktoplasty), odolnost proti únavě a tečení, výbornou adhezi k vláknům, dostatečnou tepelnou a chemickou odolnost, dobré elektrické vlastnosti a malé smrštění při vytvrzování. V důsledku polárnosti (přítomnosti hydroxylových skupin) jsou navlhavé, takže za přítomnosti vody je nutné počítat se značným zhoršením tepelné odolnosti i u pryskyřic s vysokou teplotou skelného přechodu (tetrafunkční epoxidy) v důsledku plastifikačního účinku vody [8,17].

1.2.2 Kovová matrice

Kovové matrice získávají velký význam, protože výztuž slouží ke snížení koeficientu tepelné roztažnosti a zvyšují pevnost a modul. Při použití výztuže uhlíkových vláken dochází také ke zvýšení tepelné vodivosti. Tato kombinace vlastností dělá kompozit velmi atraktivní pro aplikaci elektronické obaly (např. chladiče). [9]

Ve srovnání se samotným kovem, uhlíkové vlákna s kovovou maticí jsou charakterizována vyšším poměrem pevnosti k hustotě (tj. měrná pevnost), lepší vysokoteplotní mechanické vlastnosti (vyšší pevnost a nižší creep), nižší koeficient teplotní roztažnosti a lepší odolnost proti opotřebení. [12]

Při porovnání kompozitu s uhlíkovými vlákny s polymerní maticí, se uhlíková vlákna v kovové matici vyznačují vyšší tepelnou odolností, vyšší požární odolností a vyšší tepelnou vodivostí. Oproti tomu špatně absorbují vlhkost.

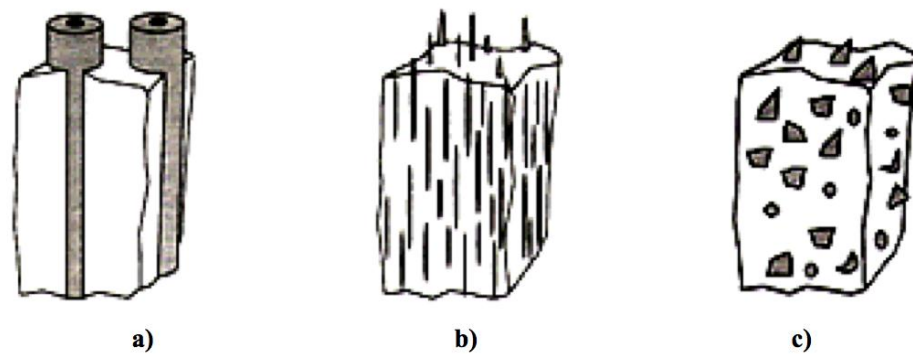
Na druhé straně kovové matrice mají následující nevýhody ve srovnání s kovem samotným - vyšší výrobní náklady a zkušenosti výrobní obsluhy.

Vlákna používaná pro nosné kovové matrice jsou většinou ve formě kontinuálních vláken, ale krátká vlákna se používají také. Na matici je použit - hliník, hořčík, měď, nikl, slitiny cínu, stříbra a mědi, a slitiny olova. Hliník je zdaleka nejvíce používaný jako maticový kov z důvodu její nízké hustoty, nízké teploty tání, což je výhodné pro spojení všech složek při výrobě pro nízké náklady a dobré tvarové opracování. Hořčík má poměrně nízkou teplotu tání a jeho hustota je dokonce nižší než hliník. Aplikace struktury hliníku a hořčíku jsou využívány převážně na elektronické chladiče. [9,12,17]

Oproti polymerní matici jsou však podstatně vyšší výrobní náklady. Dnes se kovové matrice nejčastěji dělí na hliníkové slitiny (rozsah teplot 300 až 400 °C), titanové slitiny (rozsah teplot 500 až 600 °C) a na super slitiny, které jsou na bázi niklu, kobaltu a železa (teplotní rozsah 1000 až 1150 °C).

- Kontinuální výztuž kompozitu, které jsou tvořeny spojitými vlákny nebo jemnými nekonečnými vlákny.
- Diskontinuální výztuž kompozitu, obsahující krátká vlákna, vlákno s vysokým poměrem délky k tloušťce nebo částice (whiskery). [9]

Společné výztužné prvky jsou karbid křemíku (SiC), oxid hlinitý (Al_2O_3), titan borid (TiB_2), bor a grafit. Tyto typy výztužných částic jsou nejčastěji používány.



Obr. 5. Schématické výztuže typu o MMC [9]

- a) Dlouhé jednosměrné vlákno
- b) Krátké vlákno a vlákna s vysokým poměrem délky k tloušťce (whiskery)
- c) Částice

Kontinuální výztužné kompozity mají možnost využít vlastnosti ve zvoleném materiálu jako matrice a to jako lepší odolnost proti opotřebení, nižší koeficient tepelné roztažnosti a vyšší tepelnou vodivost. Tyto materiály se vyznačují vysokou mechanickou pevností (zejména únavová pevnost) podél směru výztuže, takže jsou velmi anizotropní. [7,9]

Diskontinuální výztuž má pozitivní vliv na vlastnosti jako jsou tvrdost, odolnost proti opotřebení, únava odpor, rozměrovou stálost a pevnost v tlaku. Tyto materiály také vykazují významný nárůst v tuhosti, ale na úkor tažnosti a lomové houževnatosti. Mezi nejvíce používané kovové slitiny jako matrice v MMC jsou hliník, titan, hořčík a měď. Kombinace systémů MMC lze shrnout následovně: [7,19]

- Hliník

Dlouhé vlákna: bor, karbid křemíku, oxid hlinitý, grafit

Krátké vlákna: oxid hlinitý, oxid hlinitý, křemík, karbid křemíku

Částice: karbid křemíku, karbid boru

- Hořčík

Dlouhá vlákna: oxid hlinitý, grafit, karbid křemíku

Částice: karbid křemíku, karbid bóru

- Titan

Dlouhé vlákno: karbid křemíku

Částice: karbidu titanu

- Měď

Dlouhé vlákna: karbid křemíku, grafit

Částice: karbidu titanu, karbid křemíku, karbid bóru

Jemné vlákna: niob - titan

Mechanické a tepelné vlastnosti MMC lze shrnout následující tabulkou:

Tab. 3: Mechanické vlastnosti MMC

Hustota ρ	2,5 – 3,1 g/cm ³
Modul pružnosti E	90 - 300 GPa
Pevnost v tahu σ_P	300 - 700 MPa
Tepelná vodivost λ	120 – 200 W/mK

1.2.3 Uhlíková matrice

Uhlíková matrice se používá v kombinaci s uhlíkovými výztužemi, kde se bere v úvahu nízká hmotnost a odolnost proti vysokým teplotám např. tepelné izolace raketoplánu a u komponentů (např. disky a třecí elementy brzd letadel). Je podobně křehká jako keramická matrice. Značnou nevýhodu tvoří vysoké náklady na výrobu a oxidace na vzduchu ($2C + O_2 \rightarrow 2CO$), čímž se odpařuje. Modul pružnosti E grafitové matrice je 15 až 25 GPa.

Uhlíkové vlákna v uhlíkové matrici, nazývané také uhlík-uhlík, jsou nejvíce pokročilá forma uhlíku, výztuž uhlíkového vlákna dělá materiál silnější, tvrdší a odolnější vůči teplotním šokům. Díky nízké hustotě uhlíku patří forma uhlík-uhlík mezi nejvýznamnější kompozity, kde sledujeme tyto vlastnosti - měrná pevnost (pevnost / hustota), specifický modul (modul / hustota) a měrná tepelná vodivost (součinitel tepelné vodivosti / hustota). Kromě toho, koeficient tepelné roztažnosti blíží se nule. [7,9,19]

Tab. 4 Mechanické vlastnosti uhlíkové matrice

Hustota ρ	1,6 – 1,9 g/cm ³
Modul pružnosti E	155 – 480 GPa
Pevnost v tahu σ_P	210 - 530 MPa
Tepelná vodivost λ	440 – 690 W/mK

1.2.4 Keramická matrice

Keramická matrice je tvořena ze skla, sklokeramiky nebo keramiky. Výztužná vlákna slouží především ke zvýšení tuhosti a pevnosti (pevnost v tahu a ohybu). Hlavní výhodou keramické matrice je, že při správné výrobě mají mnoho výhod monolitické keramiky, jako je mnohem nižší hustota. Sledujeme dobrou pevnost v tahu i při teplotách, kterým některé kovové matrice již neodolávají. Jsou lepší než uhlíková matrice z hlediska odolnosti vůči oxidaci, ale nejsou tak rozvinuté jako uhlíkové matrice. Má dobrou tepelnou a chemickou odolnost. Je ale velmi křehká, silně vrubově citlivá a má malé poměrné prodloužení při přetržení. Keramická matrice špatně přenáší zatížení do vláken. Maximální objemový podíl vláken je 50 %, při větším obsahu vláken se matrice stává pórovitou. [9,12,77]

Používají se v řadě komerčních výrobních aplikací. Jeden z nejúspěšnějších je karbid křemíku vyztužený hliníkem, jako vložka řezného nástroje, který mají větší lomovou houževnatost a odolnější než monolitické keramiky. Další aplikace je v letectví a kosmonautice.

Tab. 5 Mechanické vlastnosti CMC

Hustota ρ	2,1 – 2,4 g/cm ³
Modul pružnosti E	95 – 140 GPa
Pevnost v tahu σ_P	195 - 220 MPa
Tepelná vodivost λ	15 – 19 W/mK

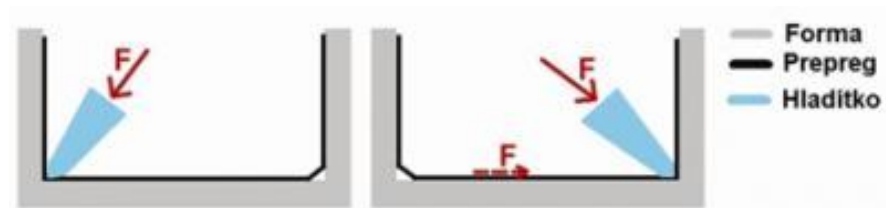
1.3 Prepregy

Prepreg tvoří výztuž materiálu s předem impregnovaným polymerem nebo pryskyřice v podobě matrice při kontrolovaném poměru. Při zpracování dochází k vytvrzování za zvýšené teploty, kterou provází chemické reakce například zesíťování, kde se prepreg přemění se do pevného konstrukčního materiálu.

Na výrobním procesu je důležité zajistit:

- Stálou tlakovou sílu pro vytvoření tvaru
- Teplo pro zahájení vytvrzovací reakce

Výroba probíhá skládáním prepregu, což je předpřipravený polotovar složený z vláken a matrice v gelovitém stavu. Matrice je mírně lepkavá a umístí se na definovanou pozici ve formě. Vyskládaný díl je slisován v dvoustranné formě s vlastním vyhříváním. Cena forem je velmi vysoká, proto je vyžadována vysoká sériovost produkce. V oboustranně uzavřené formě, ale nastávají problémy s odvodem zachyceného vzduchu, což bývá příčinou porozity výrobků a vysoké zmetkovitosti. [17,20,21,24]



Obr. 6 Skládání prepregu do formy [23]

Výroba pohledových dílů má tato specifika:

- nejlepšími výsledky je dosahováno autoklávovou technologií, která vyžaduje vysoké investice do zařízení a je provozně nákladná;
- velké nároky jsou kladeny na finální leštění forem, a proto jsou používány nákladné kovové formy;

- vzhledem k distribuci matrice a souměrnosti kladení vláken jsou použity drahé předpřipravené polotovary - prepregy;
- malá odchylka při ruční skladbě dílu způsobí neshodný výrobek, a proto díly skládají speciálně školení operátoři a je často aplikována přímá kontrola procesu;
- vytvrzovací cykly za zvýšené teploty a tlaku mají prodlevy k prohřátí přípravku a ideálnímu tečení matrice dílu, tímto se vytvrzovací cyklus prodlužuje a prodražuje;
- uhlíková vlákna jsou velmi abrazivní a obrábění vytvrzených dílů není možné běžnými nástroji, je zapotřebí použití speciálních obráběcích strojů;
- pro dokonalý lesk dílu je nutné aplikovat velmi jemné broušení, po kterém následuje lakování pohledových ploch průzračným lakem;
- nedokonalosti produktů se velmi často nedají opravit a vzniká tak zmetek s velkými vloženými náklady. [17,19,20,22,23]

2 TEPELNÉ VLASTNOSTI

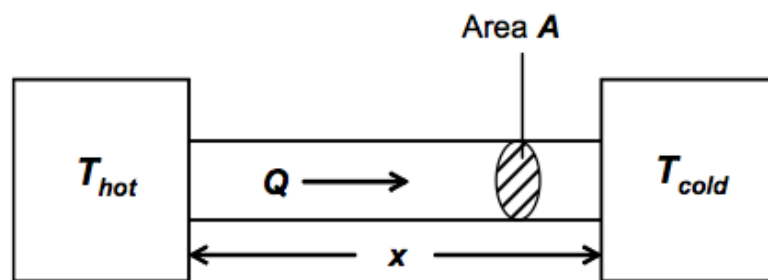
Do důležitých znaků při zkoumání tepelných vlastností materiálu patří tepelná roztažnost, měrné teplo a tepelná vodivost. Tato práce se zabývá tepelnou vodivostí kompozitních materiálů. Tepelná vodivost je ovlivňována molekulární strukturou, především poměrem primárních vazebných sil podél hlavního řetězce a sekundárních vazebných sil vedlejších řetězců. V kompozitním materiálu je obtížné matematické vyjádření tepelné vodivosti, kde matrice zastupuje významnou roli při vedení tepla.

2.1 Tepelná vodivost

Tepelná vodivost λ , popisuje schopnost materiálu sdílet tepelnou energii vedením. Hodnota λ je rozdílná pro každý materiál. Je definována: [25]

$$\Delta Q / \Delta t = kA (\Delta T / x), \quad (1)$$

kde Q je teplo (s jednotkami J), t je doba, $\Delta Q / \Delta t$ je tepelný tok (tj. množství tepla proudícího za jednotku času), A je plocha příčného průřezu z materiálu kolmo ke směru proudění tepla, a ΔT je teplotní rozdíl mezi dvěma konci materiálu délka x ve směru toku tepla, jak je znázorněno na obr. 7, kde jednorozměrný tok tepla se předpokládá (tj., nedochází ke ztrátě tepla do okolí). Rovnice 1 znamená, že tepelná vodivost je tepelný tok na jednotku plochy příčného průřezu na gradientu teploty. Tepelný tok na jednotku plochy příčného průřezu je také nazýván tepelný tok. Vzhledem k tomu, $W = J / s$, jednotky k jsou $W / (m \cdot K)$, které jsou stejné jako $W / (m \cdot ^\circ C)$. [25,26]



$$\Delta T = T_{hot} - T_{cold}$$

Obr. 7 Teplo proudící z horkého na studený konec materiálu o průřezu A , délce x

[9]

2.2 Matematický model výpočtu tepelné vodivosti kompozitu

Tepelná vodivost kompozitu k_c lze vypočítat z tepelné vodivosti a objemové poměru jednotlivých složek (označené 1 a 2) v kompozitu. Uvažujme případ, kdy jsou součásti umístěny paralelně, jak je znázorněno na obr. 8. Tepelný tok ve složce 1 plus ve složce 2 se rovná tepelný tok v celkovém kompozitu. Proto, na základě rovnice 2. [9,13,17,26]

$$k_1 A_1 (\Delta T / x) + k_2 A_2 (\Delta T / x) = K_c A (\Delta T / x), \quad (2)$$

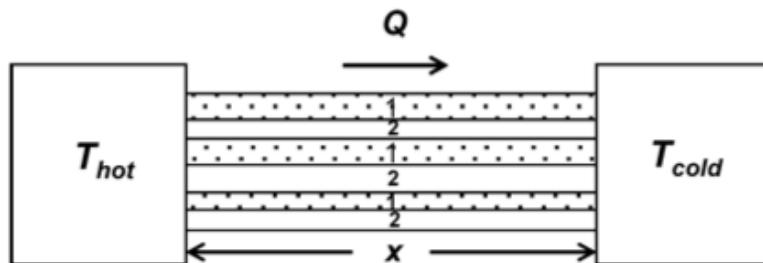
kde k_1 a k_2 jsou tepelné vodivosti složek 1 a 2, A_1 a A_2 jsou průřezy (všechny průřezy z každé složky posuzují dohromady) složek 1 a 2 v uvedeném pořadí a je plocha průřezu z celkového kompozitu. Je zřejmé,

$$A = A_1 + A_2. \quad (3)$$

Ve výsledku může být zapsáno,

$$k_c = (k_1 A_1 / A) + (k_2 A_2 / A) = v_1 k_1 + v_2 k_2, \quad (4)$$

kde $v_1 = A_1 / A$ je objemový podíl složky 1, a $v_2 = A_2 / A$ je objemový podíl složky 2. Rovnice 2 se výhradně používá pro paralelní zapojení. [7,9,26]



Obr. 8 Paralelní způsob měření [9]

Dále je třeba uvést případ, kdy složky jsou v sérii, jak je znázorněno na obr. 9. Teplotní rozdíl mezi oběma konci kompozitu dáno,

$$\Delta T = \Delta T_1 + \Delta T_2, \quad (5)$$

kde ΔT_1 je teplotní rozdíl od složky 1 (všechny proužky složky 1 spolu) a ΔT_2 je teplotní rozdíl od složky 2 (všechny proužky složky 2 spolu). [9,13,26]

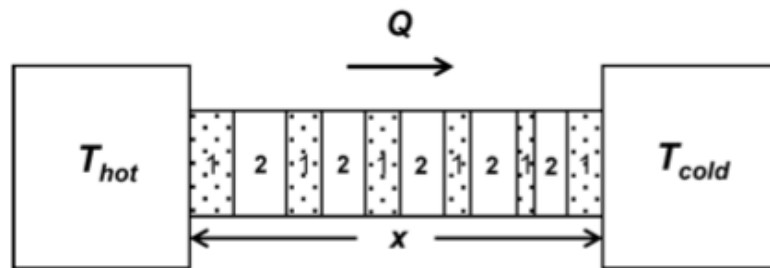
$$(\Delta Q / \Delta T) [x_1 / (k_1 A)] + (\Delta Q / \Delta T) [x_2 / (k_2 A)] = (\Delta Q / \Delta T) [x / (k_c A)], \quad (6)$$

za předpokladu, že obě složky mají stejný průřez plochy A . Zjednodušení rovnice 6 dostaneme,

$$x_1/k_1 + x_2/k_2 = x/k_c \quad (7)$$

kde $v_1 = x_1/x$ je objemový podíl složky 1, a $v_2 = x_2/x$ je objemový podíl složky 2. Rovnice 8 je pravidelně používána pro sériovou konfiguraci. [9,13,26]

$$v_1/k_1 + v_2/k_2 = 1/k_c \quad (8)$$



Obr. 9 Sériový způsob měření [9]

2.3 Tepelný odpor

Tepelný odpor je vlastnost tepelně izolovat dvě prostředí mezi materiálem. Závisí na tloušťce a tepelné vodivosti. Jednotka zastupuje obrácenou hodnotu $(\text{m.K}) / \text{W}$. Z rovnice 1 tepelný odpor dáno vztahem $1/k$, [9]

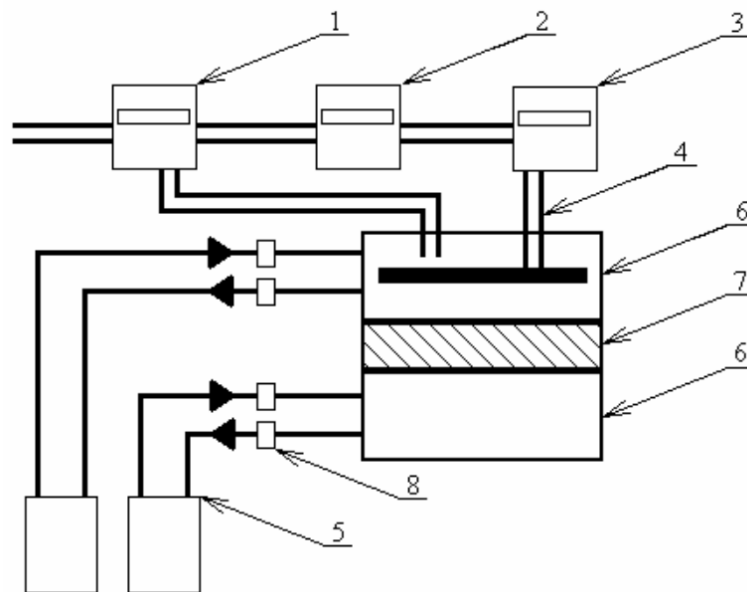
$$1/k = [(Dt/x)] / (\Delta Q/Dt) \quad (9)$$

2.4 Způsoby měření tepelné vodivosti

Základní princip je založen na stejných metodách, kde teplo přechází od povrchu vyhřívané desky, válce nebo koule izolační vrstvou k chladnějšímu povrchu. U měření zjišťujeme obě povrchové teploty a množství tepla na tloušťce vzorku. Nejčastěji převodem elektrické energie spotřebované ve vyhřívacím zařízení. Starší přístroje využívaly množství přiváděné kapaliny pro odečtení množství tepla z oteplení nebo ochlazení. K měření tepelné vodivosti se využívají metody: [26]

Stacionární měření tepelné vodivosti (měření při ustáleném stavu)

Není teplota funkcí času, ale jen souřadnic. Nejjednodušší případ, který se v teorii vedení tepla vyskytuje, je jednorozměrné stacionární vedení tepla rovinou deskou. K vyhodnocení používáme přístroj podle Bocka nebo deskový přístroj podle Poensgena. [26]

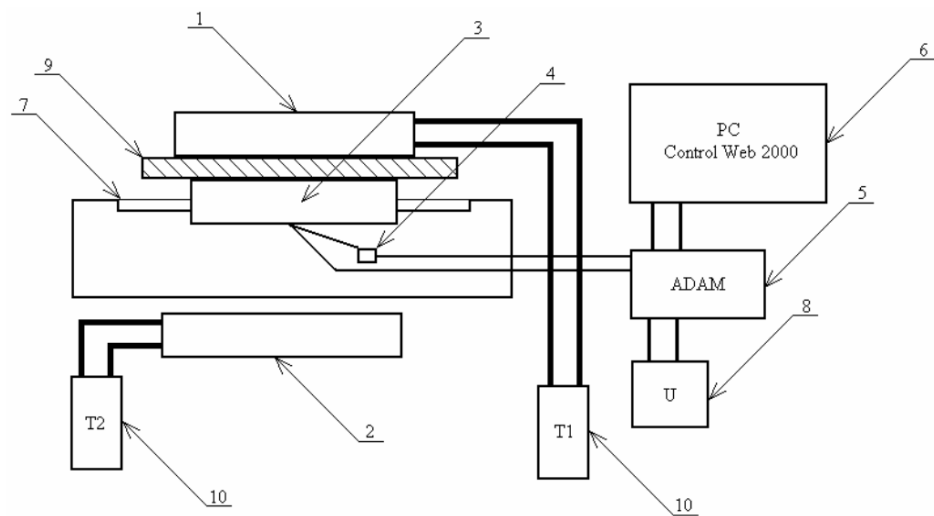


Obr. 10 Schéma přístroje dle Bocka, 1 - Motorový kompenzátor, 2 – Wattmetr, 3 - 12 Stupňový přepínač výkonu, 4 - Topení (70Ω), 5 – Termostaty, 6 - Topné desky, 7 - Zkušební deska, 8 - Odporové teploměry

Nestacionární měření tepelné vodivosti (měření při neustáleném stavu)

Teplota v určitém místě mění s časem. V praxi se nejčastěji setkáme s případem, kdy je teplo vedeno pouze v jednom směru. Teplota je tedy funkcí času a pouze jediné souřadnice. K vyhodnocení používáme přístroj podle Fitcha nebo přístroj Alambeta. [26]

V současné praxi se začínají postupně uplatňovat metody založené na neustáleném toku tepla. Mezi výhody tohoto způsobu měření patří především krátká doba měření, jednoduchost postupu.



Obr. 11 Schéma přístroje dle Fitche, 1 - Temperační deska pro teplotu t_1 , 2 - Temperační deska pro teplotu t_2 , 3 - Měřicí váleček, 4 - Termočlánek, 5 - Systém ADAM, 6 - Osobní počítač, 7 - Izolační kryt měřícího válečku, 8 - Stabilizovaný stejnosměrný zdroj, 9 - Měřený vzorek, 10 – Termostaty

3 KOMPOZIT A JEHO ELEKTRICKÉ VLASTNOSTI

V polymerních kompozitních materiálech přenos elektrických nábojů je závislý na jejich struktuře a elektrických vlastnostech jednotlivých komponent. Běžně používané vodivé kompozity tvoří nevodivou matici plněnou vodivým plnivem. Mají velmi široké uplatnění v oblasti elektrotechniky a elektroniky jako: ochranné materiály, dielektrika, konstrukční materiál, elektricky vodivé materiály pro antistatické účely a jiné.

3.1 Elektrická vodivost polymerních kompozitů

Výsledné elektrické vlastnosti polymerních kompozitních materiálů složeného z volného plniva vložené do izolační matrice jsou ovlivněny koncentrací plniva, rozměry plniva uspořádání v matici. Vodivost se výrazně mění s kritickým obsahem plniva nazývána perkolační práh. Při této koncentraci je vytvořena vodivá dráha umožňující přenos náboje v kompozitním materiálu. [27]

Specifická elektrická vodivost je popsána vztahem,

$$i = \sigma \cdot I_E \quad (10)$$

kde i je proudová hustota, σ je specifická elektrická vodivost, I_E je intenzita elektrického pole.

Polymery vykazují velmi nízké hodnoty specifické vodivosti (10^{-12} - 10^{-15} S cm⁻¹), proto jsou označovány za izolanty. Nicméně tato vodivost může být zvýšena přidáním vodivých plniv v polymerní matici. Elektrickou vodivost kompozitů lze popsat perkolační teorií. [28,29,30,31]

Tab. 6 Základní rozdělení elektricky vodivých látek

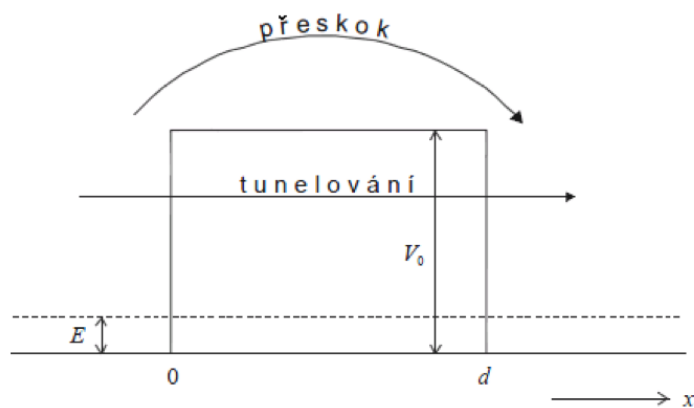
$10^2 - 10^8$	kovy, vodivost s teplotou klesá
$10^{-8} - 10^2$	polovodiče, vodivost s teplotou roste
$10^{-20} - 10^{-8}$	izolátory, vodivost s teplotou roste

3.2 Perkolační teorie

Zásadní informaci o vodivosti kompozitního materiálu vypovídá perkolační křivka, jedná se o závislost elektrické vodivosti popřípadě odporu na koncentraci plniva v matici.

Při určování vodivosti kompozitu ovlivňuje koncentrace elektricky vodivého plniva a vzdálenost mezi dvěma sousedními částicemi pro přenos náboje. U nízké koncentrace částic vodivého plniva jsou částice od sebe separovány vrstvou nevodivé matrice a přenos náboje se děje na principu tunelování nebo přeskoků. Celková vodivost kompozitu je nízká a přenos náboje je neefektivní. [28]

V případě, že vzdálenost mezi částicemi je větší než 10 nm, proces tunelování nenastane a všechna vodivost závisí na vodivosti matrice. U vzdálenosti menší než 10 nm se náboj přenesou tunelováním nebo přeskokem obr. 12. [29]

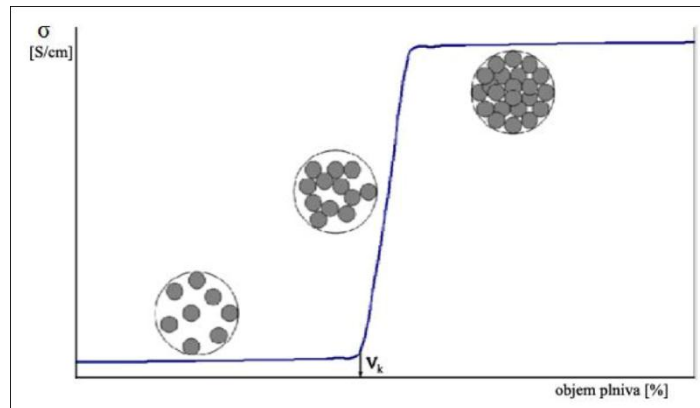


Obr. 12 Přenos náboje tunelováním a přeskokem [30]

Elektron s kinetickou energií ve formě vlny narazí na potenciálovou bariéru o výšce V a šířce d , která je větší než energie E . Z kvantové teorie vyplývá, že zde existuje jistá nenulová pravděpodobnost, že se elektron ocitne na druhé straně bariéry. Tomuto jevu se říká tunelovací mechanismus a závisí na šířce a výšce potenciálové bariéry, ale není závislý na teplotě. Při vysokých intenzitách napětí (kolem 100 V/cm) se šířka bariéry zmenšuje, což podporuje tunelování. [27,30]

Zvyšováním koncentrace částic v kopolymeru až do koncentrace, kdy se částice začnou dotýkat a vytvářet makroskopickou síť vodivých řetězců (oblast perkolace) vzroste vodivost o několik řádů obr. 13. Klíčovým bodem je perkolační práh, což je minimální koncentrace vodivého plniva, při kterém se v daném systému vytvoří makroskopický řetězec. Dokud objem plniva v kompozitu nedosáhne takzvaného perkolačního prahu neboli kritické koncentrace V_k , plnivo nemá na vodivost téměř žádný vliv, po překročení této hranice se

ovšem vodivost začne prudce zvyšovat s pouze malým přírůstkem objemu plniva až na maximální hodnotu. [28,31]



Obr. 13 Závislost koncentrace plniva na vodivosti [31]

Závislost koncentrace plniva na vodivosti můžeme určit pomocí perkolační teorie. Z toho vyplývá, že pravděpodobnost převedení elektrického náboje mezi dvěma vodivými částicemi klesá exponenciálně s jejich rostoucí vzdáleností. Tyto modely vycházejí z několika perkolačních teorií, kterým patří i model Broadbent and Hammersley. Dle autorů vychází z mřížkového modelu pro tok tekutin přes statisticky neuspořádané médium, kde nemůže tekutina protékat v případě, kdy koncentrace aktivního média je menší než určitá nenulová prahová hodnota. Další statistické perkolační modely popsal Kirkpatrick, Scher a Bueche. [29]

3.2.1 Vlastnosti kompozitu nad prahem perkolace

Z perkolační teorie se vodivost kompozitu a koncentrace vodivého plniva určuje podle rovnice 11,

$$\sigma_c = \sigma_f (\varphi_f - \varphi_{krit})^t \quad (11)$$

kde σ_c je vodivost kompozitu [$\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$], σ_f je vodivost plniva [$\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$], φ_f je objemový podíl plniva (%), φ_{krit} je objemový podíl plniva na perkolačním prahu (%), t je kritický exponent pod oblastí perkolačního prahu. Kritický exponent t nezávisí a typu perkolace, ale na dimenzi prostoru. [28,31]

3.2.2 Vlastnosti kompozitu na prahu perkolace

Při zvyšování objemového podílu vodivého materiálu se dostaneme na hodnotu kritického objemového podílu, kdy vodivost vzroste k hodnotě blíží se vodivosti čistého plniva a platí rovnice 12, [27,28]

$$\sigma_c = \sigma_f (\sigma_m / \sigma_f)^s \quad (12)$$

kde σ_m je vodivost matrice [$S \cdot cm^{-1}$], s je kritický exponent pro oblast perkolace.

Kompozity plněné krátkými uhlíkovými vlákny (CF) jsou obvykle považovány za neuspořádaný systém, pro který jsou typické rozsáhlé vodivé oblasti (či dlouhé vodivé cesty) oddělené menšími nevodivými bariérami. [28]

3.2.3 Vlastnosti kompozitu pod prahem perkolace

Při objemovém podílu menším než kritickém je vodivost kompozitu pomalu se měnící funkce, jejíž hodnoty se blíží hodnotám čisté matrice. Vzdálenosti mezi částicemi jsou velké a přenos náboje není možný. Vodivost se s rostoucí koncentrací zvyšuje jen mírně. Vodivost kompozitu platí rovnice 13,

$$\sigma_c = \sigma_m (\varphi_{krit} - \varphi_f)^{-q}, \quad (13)$$

kde φ_{krit} je kritický objemový podíl při perkolačním prahu, φ_f je objemový podíl plniva, q je kritický exponent pod oblastí perkolačního prahu. [19,27,28,31]

4 APLIKACE MATERIÁLŮ V ELEKTROTECHNICKÉ PRAXI

Ve skutečnosti materiál notebookového obalu skrývá mnoho znalostí a hraje důležitou roli při používání přístroje. Hlavním úkolem je ochrana před vnější silou, nárazem, ohýbání v části displeje, co může zkrátit životnost. Poslední trend vývoje ukazuje tenké displeje a to má veliký dopad na volbu pevného materiálu schopného ochránit.

Za druhé vnitřní kompaktnost pro uspořádání komponentů, odvod tepla, které musí odvádět z místa vzniku, aby nedošlo k vážnému poškození vnitřních komponentů. Vzhledem ke spotřebitelskému trhu do výběru materiálu se zahrnuje také váha, barva.

ABS a PC inženýrské plasty:

Konstrukční plast, který je PC + ABS (plastové slitiny) používán pro dobrou tepelnou odolnost a pevnost PC, odolnosti proti povětrnostním vlivům, stability, odolnosti proti nárazu, schopnost zpomalovat hoření a odolnost proti skvrnám a dobrou zpracovatelností. Nevýhodou ABS plastu je nízká tepelná vodivost. Poměr těchto dvou komponent ovlivňuje tepelnou odolnost. Obecně platí, že ABS a PC inženýrské plasty kvůli nízké ceně využívá většina výrobců pro výrobu notebooků všech cenových kategorií. [32]



Obr. 14 Kryt z ABS plastu [33]

Tab. 7 Přehled vlastností inženýrských plastů

Fyzikální vlastnosti	PC	ABS	PC+ABS	Norma
Hustota	1,2 g/cm ³	1,05 g/cm ³	1,18 g/cm ³	ISO 1183B
Smrštění	0,5 až 0,7 %	0,4 až 0,7 %	0,4 až 0,6 %	
Tepelná vodivost	0,21 W/m.K	0,17 W/m.K	0,19 W/m.K	DIN 52 612
Mechanické vlastnosti	PC	ABS	PC+ABS	Norma
Modul pružnosti v tahu	2400 MPa	2350 MPa	2600 MPa	ISO 527
Pevnost v tahu	60 MPa	44 MPa	47 MPa	ISO 527
Deformace	110 %	20 %	40 %	ISO 527
Modul pružnosti v ohybu	2350 MPa	2500 MPa	2700 MPa	ISO 178
Pevnost v ohybu	95 MPa	91 MPa	92 MPa	ISO 178

Eloxovaný hliník:

Hliník (Mg, Ti, Nb, Wo, Zn) s povrchovou úpravou, kdy na jejich povrchu dochází pomocí elektrického proudu k zvýšení (nárůstu) přirozené oxidační vrstvy (2-3 nm u Al). Eloxovaný díl je stejně jako např. u procesu elektrolytického leštění oceli zapojen do okruhu jako anoda (+). Na rozdíl však od leštění oceli, u hliníku nedochází k jemnému, řízenému rozpouštění povrchu, ale naopak k vytváření oxidové krusty na povrchu kovu. Díky kyselému prostředí, v kterém se anodizace provádí, dochází současně i k opačnému ději - rozpouštění oxidační vrstvy. Tento jev však ve větší míře nekonkuruje eloxování a je žádaný k vytváření jemnější struktury pórů na povrchu kovu (\varnothing 10 - 150 nm). Dochází tak k tvorbě rovnoměrné, kompaktní vrstvy oxidu, která je výrazně tvrdší a chemicky odolnější, než samotný kov. Vytvořená pórovitá struktura rovněž zvyšuje adhezi, dobře přijímá lubrikanty a absorbuje barviva, čehož se hojně využívá k vybarvování finální vrstvy do požadovaného vzhledu nepřebernou škálou průmyslových barviv. Anodizování vytváří také dielektrický (nevodivý) film na povrchu kovu, který se uplatňuje např. při výrobě elektrolytických kondenzátorů.)



Obr. 15 Hliníkový kryt [33]

Tab. 8 Přehled vlastností hliníku

Fyzikální vlastnosti	
Hustota	2,69 g/cm ³
Tepelná vodivost	237 W/m.K
Mechanické vlastnosti	
Modul pružnosti v tahu	70000 MPa
Pevnost v tahu	280 MPa
Deformace	20 %
Modul pružnosti v ohybu	180 MPa

Slitiny hořčíku:

Hořčíkové slitiny jsou snadno barvitelné a mají lepší chladicí účinek jako ABS a PC. Stříbrná barva u slitin hořčíku vede k tomu, že produkty jsou atraktivní a módní. Výhodou je snadná barvitelnost, která umožňuje širokou škálu barev produktů. Jednou z nevýhod hořčíkové slitiny je snadné ušpinění od otisků prstů při používání a vyšší náklady související s barvením. Pro obtížné zpracování je výroba nákladná. Mezi výhody patří vysoká pevnost, efektivní odvod tepla, nízká hmotnost. Při aplikaci tloušťka 0,6 až 0,8 mm nahradí plastový díl o tloušťce 1,0 mm, tak docílíme snížení hmotnosti o 10%.



Obr. 16 Hořčikový kryt [33]

Uhlíkové vlákno:

Vyztužená uhlíková vlákna jsou velmi zajímavý materiál. Vypadá jako plast, ale síla a tepelná vodivost jsou lepší než běžných PC a ABS plastů. Vlákna uhlíková jsou vodivý materiál, který může hrát roli s vodivou maticí. Jeho pevnost a houževnatost je mnohokrát větší než u běžně použitých materiálů, poslední dobou jsou tyto výhody používané při ochraně zobrazovacích displejů přenosných počítačů, kde o malé tloušťce dokážou ochránit displej před poškozením vlivem vnější síly. Nevýhodou je cena vysoko uhlíkových vláken, složitější zpracování a vzhledová monotónnost. Takže tvar obalu z uhlíkových vláken je obecně jednoduchý.



Obr. 17 Kryt z uhlíkového vlákna [34]

4.1 Zásady při konstrukci s ohledem na generování tepla

Jak narůstá teplo z různých hardwarových součástí, musí být odvedeno, aby nedošlo k přehřátí součástí.

U stolního počítače jsou součásti generující teplo umístěny ve velké skříni, která je umístěna daleko od vás (pravděpodobně pod stolem nebo vedle něj) a ventilátor vyfukuje teplo ven větracími otvory na zadní straně, takže si přítomnost tepla ani nemusíte uvědomit. U notebooku si ale tepla pravděpodobně všimnete, protože jste fyzicky blíže všem součástem generujícím teplo i větracím otvorům.

Teplo odváděné do šasi notebooku je sice postřehnutelné, nepředstavuje však žádné bezpečnostní riziko. Na odvedení se podílí tyto faktory:

Materiál použitý na šasi počítače hraje významnou roli při odvádění tepla, protože umožňuje teplu procházet. Méně výkonné počítače, které generují méně tepla, mohou používat materiály, které jsou méně tepelně propustné, např. druhy plastů PC, ABS, směs PC+ABS. Při práci s tímto počítačem nemusíte unikající teplo ani zaregistrovat. Výkonnější počítače však mohou používat materiály, které jsou vysoce tepelně vodivé, například některé polymery, kompozity (závislost na matici) nebo kovy (hliník, hořčíkové slitiny atd). Tyto materiály se používají k odvádění generovaného tepla. Při provádění úloh náročných na procesor můžete u takového počítače zaznamenat vyšší výstup tepla.

Konstrukce kromě použitého materiálu má na odvádění tepla vliv i velikost a tvar šasi počítače. Uvnitř šasi notebooku se nachází jen minimum volného prostoru. Nucený oběh vzduchu přes součásti generující teplo vedený pečlivě navrženými kanály zajišťují ventilátory. Se zmenšující se tloušťkou a velikostí počítačů jsou k řízení proudění vzduchu a odvádění tepla navrhovány stále jemnější konstrukce šasi. Obecně lze říci, že výkonnější počítače potřebují pro odvod tepla ve srovnání s méně výkonnými modely více prostoru. Vysoce výkonný počítač, který je příliš malý, nemůže účinně odvádět generované teplo nebo nemá dostatečný prostor pro umístění požadovaných chladičů a ventilátorů.

Ventilátory a jeho systém nasávají chladný vzduch z vnější strany skříně a vyfukují jej dovnitř na součásti generující teplo. Čím více tepla počítač vygeneruje, tím rychleji se ventilátory musí točit, aby dodaly požadované množství vzduchu, který pomáhá odvádět teplo. Průtok vzduchu do počítače i ven z něj je důležitý pro odvod tepla z různých hardwarových součástí. Strategické umístění otvorů ve skříni maximalizuje volný průtok chladicího vzduchu zařízením. Počítač s vyšším výkonem může mít více otvorů než jeho méně výkonný protějšek.

II. PRAKTICKÁ ČÁST

5 STANOVENÍ CÍLŮ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Cílem diplomové práce je zkoumání tepelných, elektrických a mechanických vlastností navržené skladby kompozitní struktury v závislosti na tloušťce. Pro naše testy je zvolen kompozit ve formě prepregu uhlíkové vlákno s epoxidovou pryskyřicí vyrobeným lisováním za zvýšené teploty.

Zaměřím se u vzorku na tyto vlastnosti:

- Studium frekvenční závislosti střídavé konduktivity navržených kompozitních struktur v závislosti na tloušťce
- Studium frekvenční závislosti ztrátového činitele navržených kompozitních struktur v závislosti na tloušťce
- Studium teplotní závislosti střídavé konduktivity navržených kompozitních struktur v závislosti na tloušťce
- Studium tepelných vlastností zejména stanovení tepelné vodivosti navržených kompozitních struktur v závislosti na tloušťce
- Studium ohybových vlastností při okolní teplotě 22 °C dle normy ČSN EN ISO 14125 v závislosti na tloušťce
- Studium ohybových vlastností při zvýšené teplotě 60 °C dle normy ČSN EN ISO 14125 v závislosti na tloušťce
- Kalkulace výrobních nákladů a porovnám s doposud použitými materiály
- Shrnutí veškerých naměřených hodnot a věnovaná diskuze

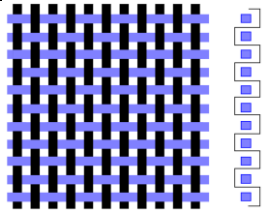
6 CHARAKTERISTIKA POUŽITÉHO MATERIÁLU

Pro experimenty jsem zvolil uhlíkové desky s prepregových polotovarů s označením Hex-Ply[®] M49 s epoxidovou matricí o dobré odolnosti proti nárazu s širokou škálou uplatnění a se snadným zpracováním v autoklávu a vakuové zpracování. Tento materiál se vyznačuje vysokou životností a UV stabilitou. Plátňová vazba nám nabízí zajímavý vzhled povrchu u konečného výrobku. Pro měření použiji vzorky o třech rozdílných tloušťkách 1 mm, 1,4 mm a 2 mm, na kterých probíhalo měření tepelných, elektrických a mechanických vlastností.

Tab. 9 Vlastnosti matrice [PI]

Barva	Průhledná
Hustota	1,18 g/cm ³
Vytvrzovací energie	290 J/g
Doba gelace při 120 °C	50 min
Teplota skelného přechodu T _g	90 °C

Tab. 10 Vlastnosti prepregu [PI]

Typ vláken	3K vysokopevnostní uhlík
Typ vazby	 plátňová vazba
Hmotnost vláken	200 g/m ²
Tloušťka jedné vrstvy prepregu	0,234 mm
Hmotnostní poměr pryskyřice	42 %
Objem výztuže vláken	47,65 %
Hustota kompozitu	1,47 g/cm ³

Výroba spočívá v nastřihání stejných rozměrů pregregových plátků. Požadovanou tloušťku kompozitu docílíme vrstvením těchto plátků na sebe. Pro docílení zvolených tloušťek ukazuje tabulka 11 počet vrstev, které jsou třeba na daný rozměr připravit.

Tab. 11 Tloušťky jednotlivých vzorků

Vzorek uhlík + epoxid	A	B	C
Požadovaná tloušťka	1 mm	1,4 mm	2 mm
Počet vrstev	4 vrstvy	6 vrstev	8 vrstev



Obr. 18 Pregregový polotovar - připraven k lisování

Připravené pregregové polotovary jsou lisovány ve vyhřívaném hydraulickém lisu obr 19, který obsahuje obě vyhřívané desky. Podmínky lisování jsou uvedeny v tabulce 12 i se spotřebou materiálu pro daný rozměr.

Tab. 12 Parametry při lisování

Lisovací teplota	140 °C	Spotřeba materiálu	Vzorek A – 1 mm	0,1024 m ²
Doba lisování	12 min		Vzorek B – 1,4 mm	0,1536 m ²
Velikost lisované desky	160x160 mm		Vzorek C – 2 mm	0,2048 m ²



Obr. 19 Vyhřívavý lis – FT UTB Zlín

Tab. 13 Technické údaje lisu

Rozměry desek	250x250 mm
Příkon	2400 W
Maximální teplota	200 °C
Svírací síla	5 t

Výsledné desky můžeme vidět na obr 20, kde se nachází 3 varianty vzorků o požadovaných tloušťkách A – 1 mm, B – 1,4 mm a C – 2 mm. Následuje příprava rozměrů dle norm a požadavků pro testování ohybové zkoušky, tepelné vodivosti a elektrických vlastností.



Obr. 20 Výsledné desky po vylisování

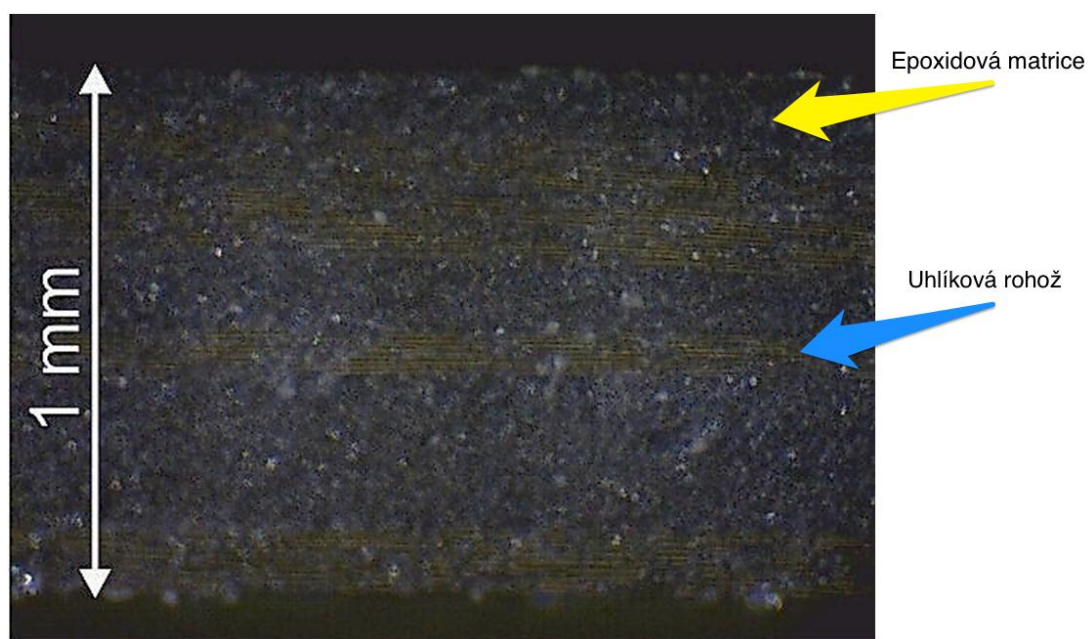
6.1 Mikroskopické zkoumání vzorku

Při mikroskopickém zkoumání řezu každého vzorku obr 22, 23, 24 jde jasně rozeznat jednotlivé vrstvy podélně rozložené uhlíkové vazby, což odpovídá počtu vrstev, které byly třeba k docílení požadované tloušťky a její prosycení. Také si můžeme všimnout několika míst se vzduchovými bublinami, které budou hrát určitý vliv na výsledcích našich testů. U měření tepelné vodivosti uzavřené malé vzduchové bubliny hůře předávají a sdílejí teplo a tím by mělo dojít k mírnému poklesu tepelné vodivosti. To samé u měření elektrických vlastností ztěžuje průchod a přeskok náboje v celém objemu. Tmavě šedé místa znázorňují prosycený povrch epoxidovou matricí.

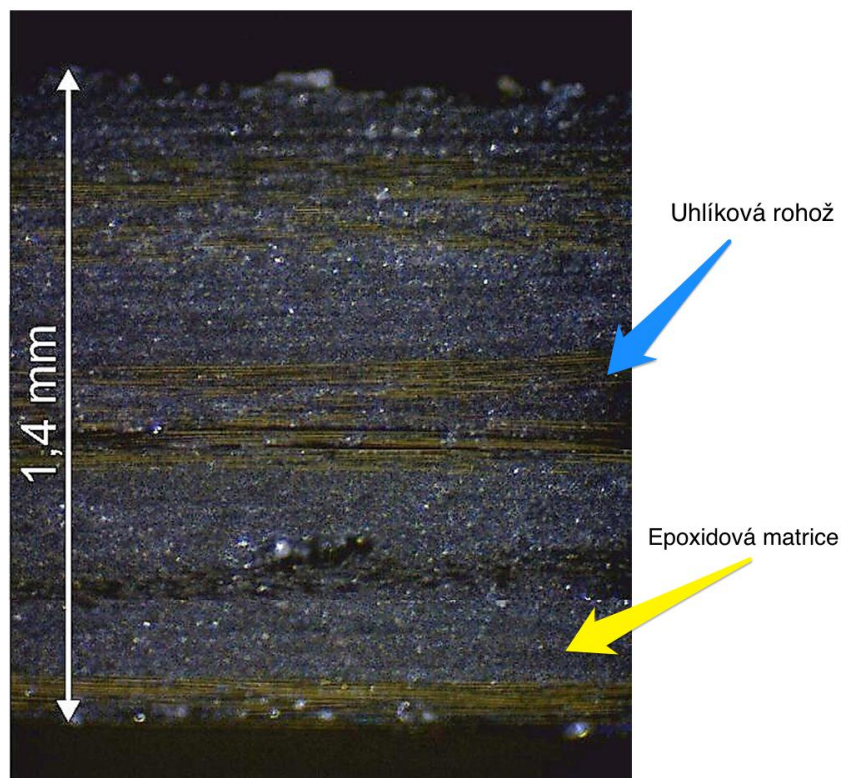
Řez tloušťkou je zobrazen na mikroskopickém zařízení s optikou Carl Zeiss Jena při 30 násobném zvětšení. Díky kamerovému snímači napojeného do počítače je možné okamžitě zpracovat pozorované výsledky.



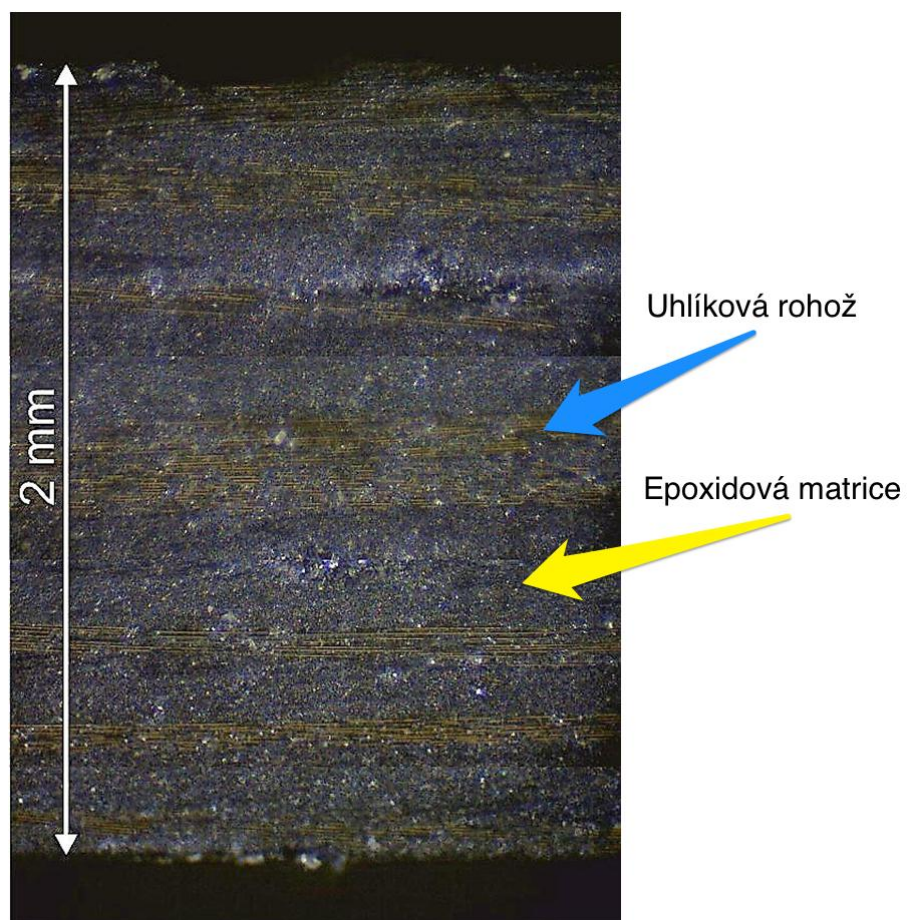
Obr. 21 Mikroskopický přístroj s optikou Carl Zeiss Jena



Obr. 22 Mikroskopický pohled na řez vzorku A – 1 mm (30x)



Obr. 23 Mikroskopický pohled na řez vzorku B – 1,4 mm (30x)



Obr. 24 Mikroskopický pohled na řez vzorku C – 2 mm (30x)

7 MĚŘENÍ ELEKTRICKÝCH A DIELEKTRICKÝCH VLASTNOSTÍ

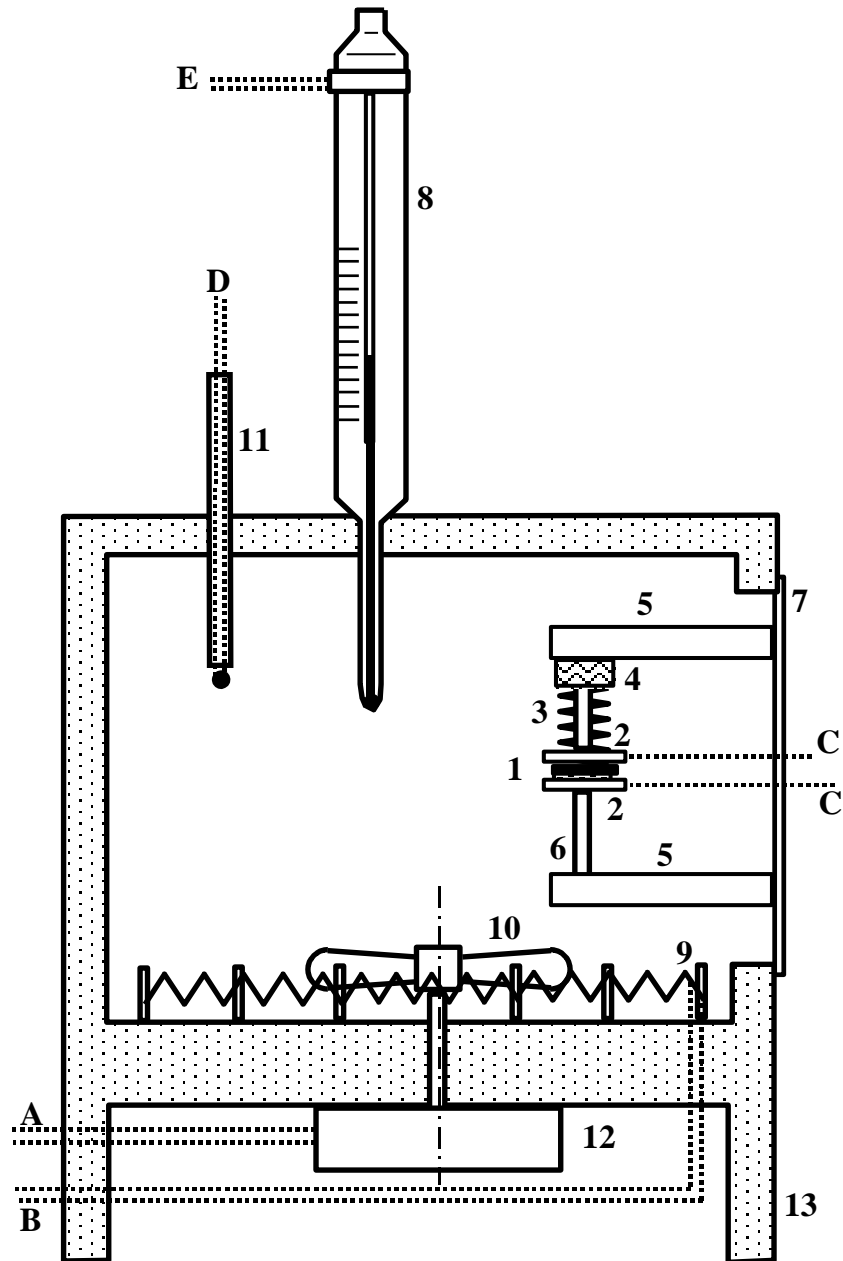
Pro měření elektrických a dielektrických vlastností byl použit LCR meter GoodWill 819. Měření používalo 50 měřících frekvencí z intervalu od 15 Hz do 100 kHz ve střídavém elektrickém poli. Na měření experimentů se kompletně podílel řídicí software.

Konstrukční řešení této měřicí buňky je zobrazeno na obr. 25 a je uzpůsobené zejména pro měření plastových vzorků. Standardně umožňuje měření vzorků s průřezem tvaru čtverce o rozměrech 10x10 mm. Měřený vzorek se standardně vkládá mezi platinové elektrody. V případě potřeby lze použít i jiné druhy kovových elektrod (měděné, z nerezavějící oceli, hliníkové), případně jiné rozměry vzorků. Uchycení vzorků a elektrod je řešeno pomocí soustavy dvou nosných křemenných kapilár uchycených na dvou kovových ramenech. Spodní kapilára je uchycena pevně, horní je pohyblivá se stálým přtlakem. Tento přtlak způsobuje předpjatá pružina opírající se o elektrodu a keramickou opěrnou destičku. Dvě kovová ramena jsou pevně uchycena na dveře měřicí buňky.

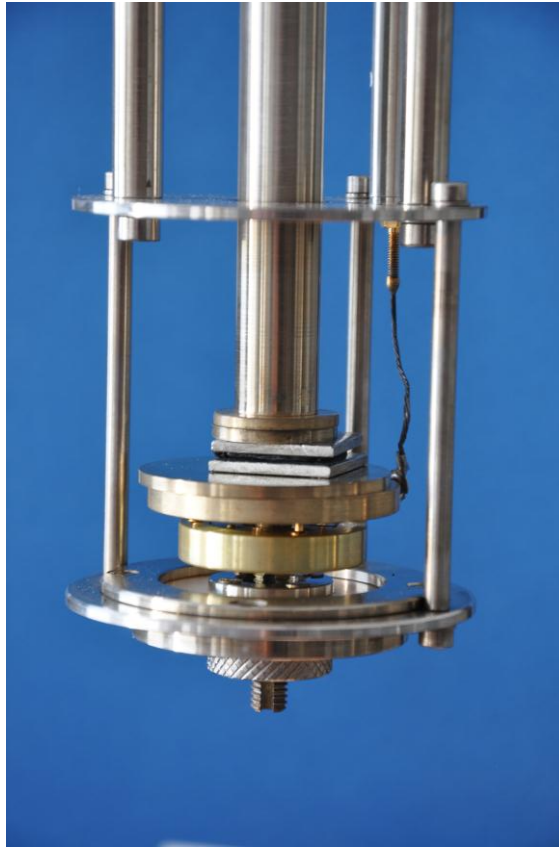
Těleso měřicí buňky je kovové. Ve spodní části prostoru buňky je na keramických sloupech uchycen výhřevný odporový drát, jehož přívody jsou vyvedeny k zadní části měřicí buňky. V zadní části měřicí buňky jsou také vývody k ventilátoru, který zajišťuje homogenní ohřev vzorku. Ovládání ohřevu může být řízeno buď z počítače, nebo pomocí spínacího teploměru Vertex s rozsahem 0 až 250 °C. Ohřev buňky lze řídit v rozsahu 20 až 200 °C. Teplotu snímá termočlánek typu K (Ni-NiCr).



Obr. 25 Buňka pro měření zejména dlouhodobých časových závislostí elektrických a dielektrických vlastností plastických látek.

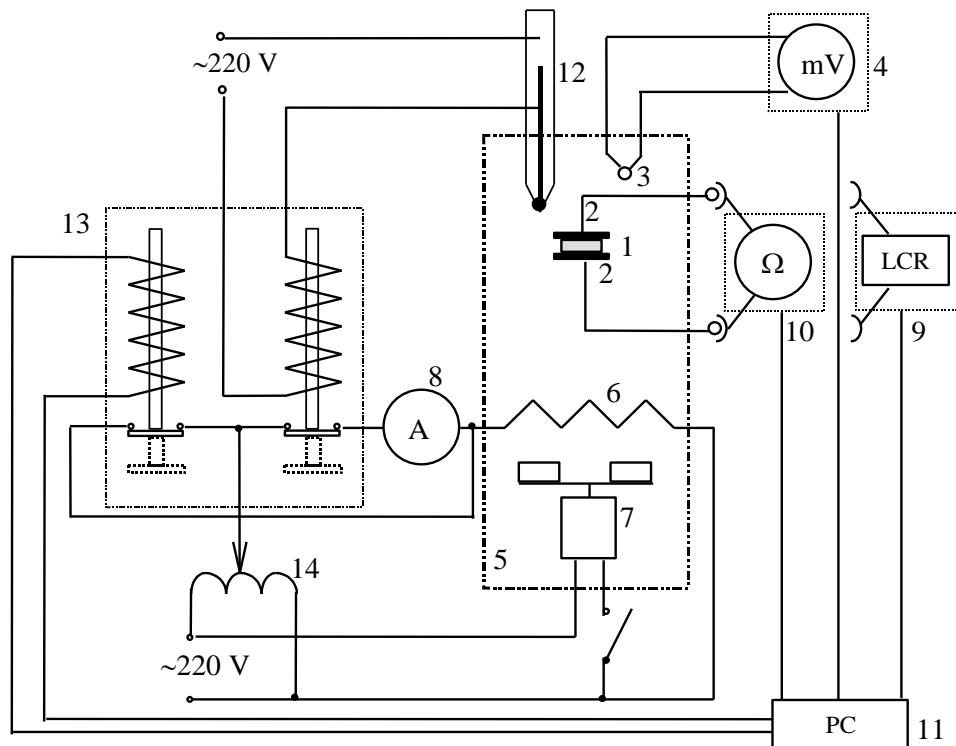


Obr. 26 Schéma měřící buňky: 1 vzorek, 2 elektroda, 3 přitlačná pružina, 4 opěrná keramická destička, 5 kovové rameno, 6 nosná křemenná kapilára, 7 dveře měřící buňky, 8 spínací teploměr Vertex od 0 do 300 °C, 9 odporový ohřev, 10 aktivní část ventilátoru, 11 termočlánek typu K (Ni-NiCr), 12 pohon ventilátoru, 13 kovové těleso měřící buňky, A elektrické přívody ventilátoru, B elektrické přívody topných těles z odporového drátu, C měřící elektrické přívody, D elektrické přívody v termočláncu typu K (Ni-NiCr), E elektr. přívody ovládání teploměru Vertex.



Obr. 27 Uchycení vzorků a elektrod

Elektrické zapojení je řešeno sice komplikovaněji, ale přináší řadu výhod obr. 28. Všechny elektrické vedení jsou nezávislé (měřicí, termočlánekové, ohřev). Je zde zajištěna vysoká homogenita teplotního pole a regulovatelnost teploty. Při měření lze alternativně připojovat na měřicí vedení LCR metr (Goodwill LCR 819, Hioki 3522-50) i digitální multimeter Appa 305. Termočlánek typu K je připojen k dalšímu multimetru Appa 305. I velikost výkonu odporového ohřevu lze regulovat pomocí autotransformátoru. Maximální výkon odporového ohřevu je 500 W.



Obr. 28 Elektrické schéma zařízení pro měření elektrických a dielektrických vlastností: 1 vzorek, 2 elektrody, 3 termočlánek typu K (Ni-NiCr), 4 milivoltmetr (DMM Appa 305), 5 měřící buňka, 6 vinutí ohřevu, 7 ventilátor, 8 ampérmetr, 9 LCR metr (Goodwill LCR 819, Hioki 3522-50), 10 ohmmetr (DMM Appa 305), 11 počítač, 12 spínací teploměr Vertex, 13 ovládání ohřevu, 14 autotransformátor.

Uvedené zapojení se opírá o měřicí přístroje s vysokou citlivostí a poměrně malou velikostí nejistoty měření tab. 14, tab. 15, tab. 16.

Tab. 14 Vybrané vlastnosti přístroje Goodwill LCR 819.

Charakteristika	Rozsah
Indukčnost L	0,00001mH - 99999H
Kapacita C	0,00001pF - 99999 μ F
Elektrický odpor R	0,00001 Ω - 99999k Ω
Stratový činitel $\text{tg } \delta$	0,0001 - 9999
Přesnost	do 0,05 %
Volitelná měřící frekvence f	12 Hz – 100 kHz

Tab. 15 Vybrané vlastnosti přístroje Hioki 3522-50.

Charakteristika	Rozsah
Indukčnost L	16.000nH – 750.00kH
Kapacita C	0.3200pF – 1F
Elektrický odpor R	10m Ω – 200M Ω
Stratový činitel $\text{tg } \delta$	0,00001 – 9.99999
Přesnost	do 2 %
Volitelná měřicí frekvence f	DC – 100 kHz

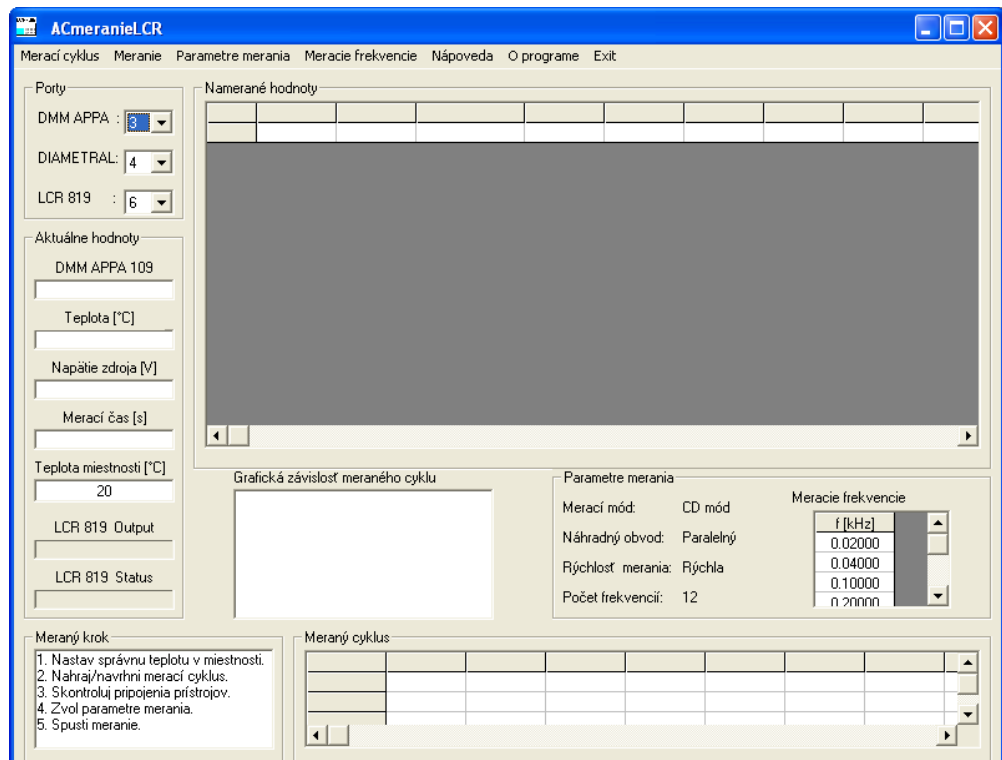
Tab. 16 Vybrané vlastnosti přístroje DMM Appa 305.

Charakteristika	Hodnota
Přesnost měření napětí U	do 0,1 %
Citlivost na rozsahu DC 20 mV	0,001 mV
Přesnost měření odporu R	do 1 %
Rozsah měření odporu R	0,01 Ω – 40 M Ω

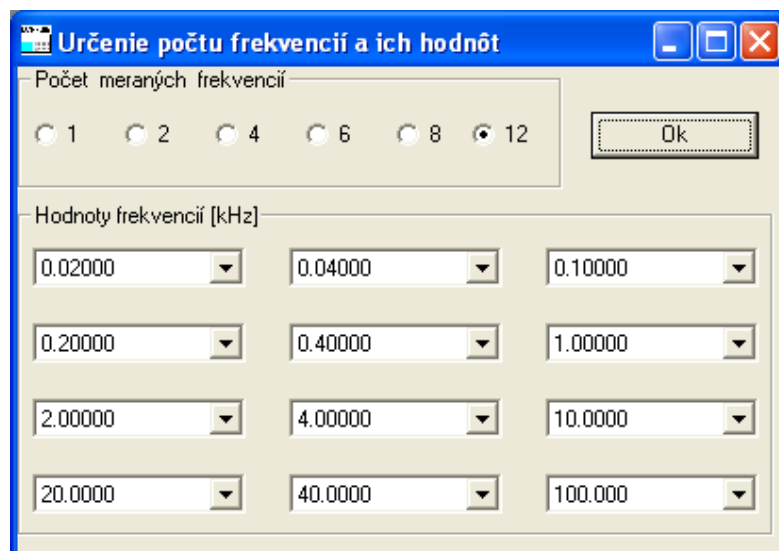
Programové vybavení vytvořené pro řízení a záznam experimentu obr. 29 umožňuje flexibilně volbu různých podmínek a průběhu měření. Je možné volit různé zapojení měřicích přístrojů na různé porty RS 232 počítače, volit rozsah měřicích frekvencí obr. 30 podle zvoleného LCR metru, volit podmínky měření (měřicí mód, druh náhradního obvodu, rychlost měření, počet měřených frekvencí).

Podle volby měřicího přístroje je určen i rozsah měřicích frekvencí. Při použití přístroje Goodwill LCR 819 je dispozici 503 frekvencí od 12 Hz až 100 kHz, při použití přístroje Hioki 3522-50 je dispozici ~ 50000 frekvencí od DC do 100 kHz. V případě použití DMM Appa 305 jsou měření soustředěny na měření elektrického odporu vzorku.

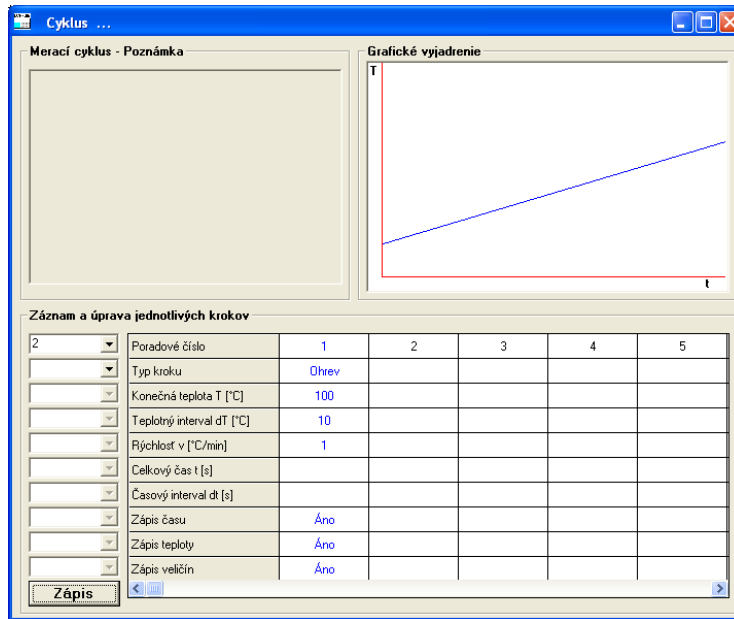
Teplotní cyklus lze určit použitím různých teplotních kroků obr. 31. Mezi základní kroky, které lze použít je lineární ohřev, výdrž na teplotě, ochlazování pomocí ventilátoru, přirozeným chladnutím i lineárních chladnutím.



Obr. 29 Pohľad na obrazovku s programovým vybavením určeným pro řízení a záznam experimentu.

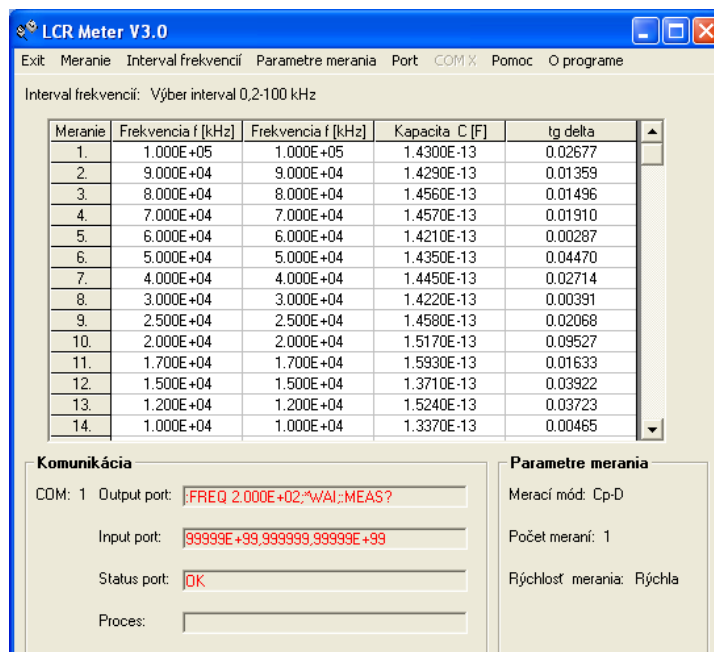


Obr. 30 Pohľad na obrazovku s určením měřicích frekvencí při použití přístroje Goodwillu LCR 819 umožňujícího volit až 503 frekvenci z rozsahu 12 Hz až 100 kHz.



Obr. 31 Pohled na obrazovku s určením teplotního cyklu, použitého při experimentu.

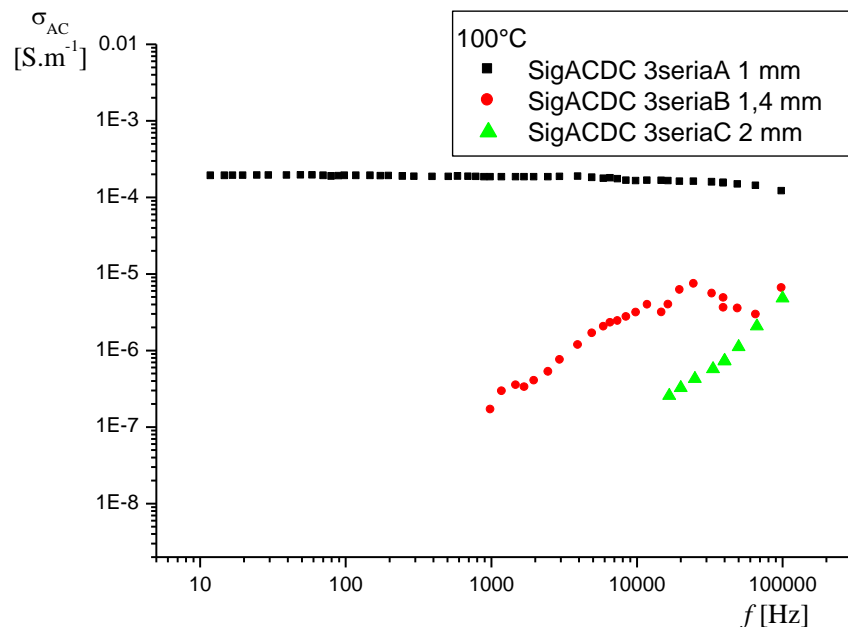
Při měření časových a frekvenčních závislostí využívajících regulaci pomocí spínacího teploměru Vertex používáme modifikované programové vybavení obr. 32.



Obr. 32 Pohled na obrazovku s programovým vybavením určeným pro řízení a záznam experimentu určený pro měření frekvenčních závislostí při konstantní teplotě.

7.1 Popis měření elektrických a dielektrických vlastností

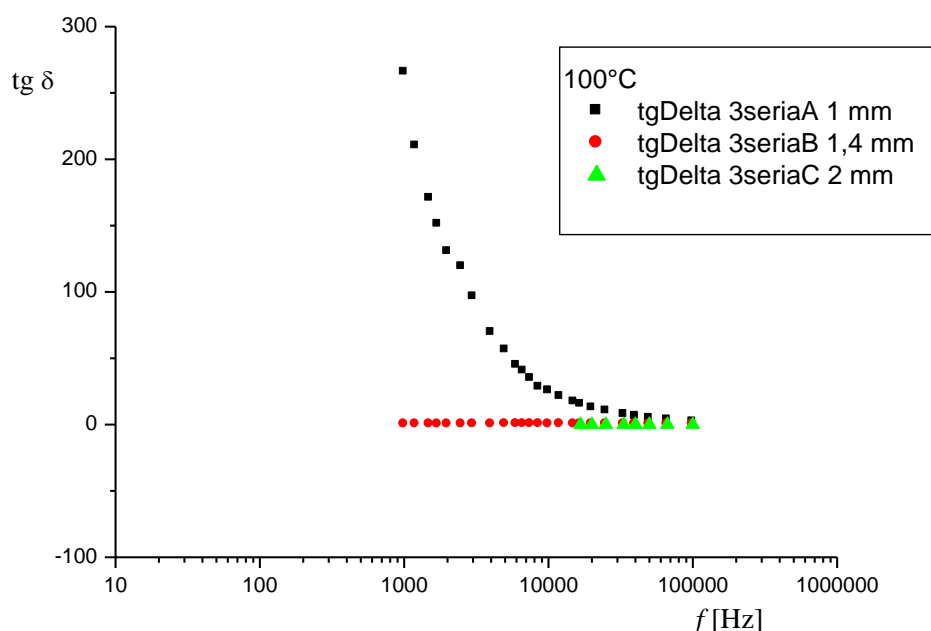
Měření proběhlo na zkušebních vzorcích prepregu - epoxidová pryskyřice vyztužená uhlíkovými vlákny tab. 11 a naměření bylo vykonáno v jednom měřicím cyklu, postupně při teplotách 20°C, 30°C, 40°C, 50°C, 60°C, 70°C, 80°C, 90°C, 100°C, 110°C, 120°C, 130°C, 140°C, 150°C. Před každým samotným měření došlo k stabilizaci vzorků na měřicí teplotu. Měření v cyklu probíhalo kontinuálně bez přerušení z elektrodového systému. Vzorky k měření měly tvar kvádrů s plochou podstavy 30x30 mm bez nanesení vlastní elektrody.



Obr. 33 Frekvenční závislost střídavé konduktivity vzorků 3. série A-1 mm, B-1,4 mm, C-2 mm stanovené při teplotě 100°C

Naměřené frekvenční závislosti střídavé konduktivity připraveného kompozitu s uhlíkovou vyztuží s různými tloušťkami (1, 1,4 a 2 mm) prezentovány na obr. 33 ukazují, že při nejmenší tloušťce 1 mm je elektrický náboj transportován mezi povrchy kompozitu prostřednictvím vodivé uhlíkové vyztuže. Při vzrůstu tloušťky kompozitu dochází pravděpodobně k přerušování vodivých cest uhlíkové tkaniny méně vodivou polymerní matricí. Kompozit se zvyšováním tloušťky se svými vlastnostmi začne přibližovat k vlastnostem polymerů s určitou dotací vodivých plniv.

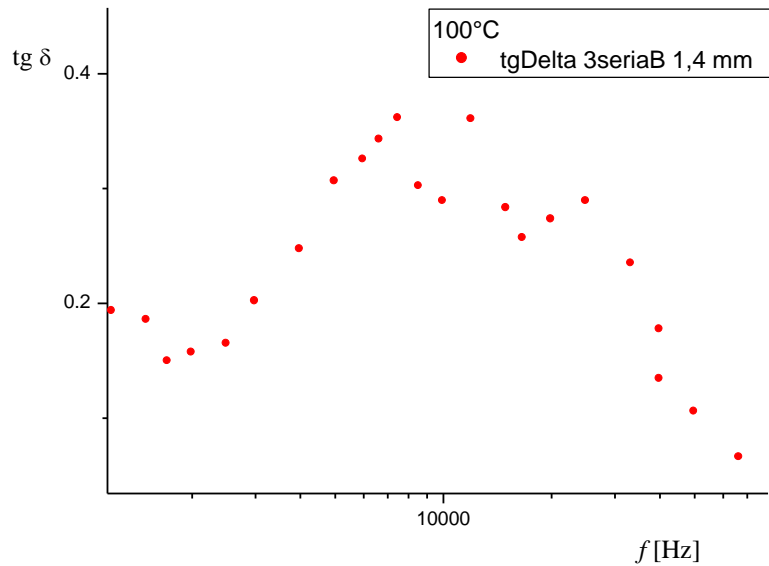
V případě vzorku A - 1 mm se hodnota konduktivity se změnou frekvence prakticky nemění. Její vysoká hodnota je dána hodnotou konduktivity výztuže. Pro vzorky B - 1,4 mm a C - 2 mm je pozorovatelná výrazná frekvenční závislost elektrické konduktivity s rostoucí tendencí při zvyšování frekvence. Takové chování lze spojit s výskytem určitého objemového podílu fází charakteristických polarizačními mechanismy s krátkým relaxačním časem. To znamená, že v případě vzorků B a C již neexistuje přímé spojení mezi čely kompozitu vytvořené pomocí vodivé výztuže a případně vodivých částic a hodnota konduktivity je ovlivněna zastoupením polymerní složky kompozitu.



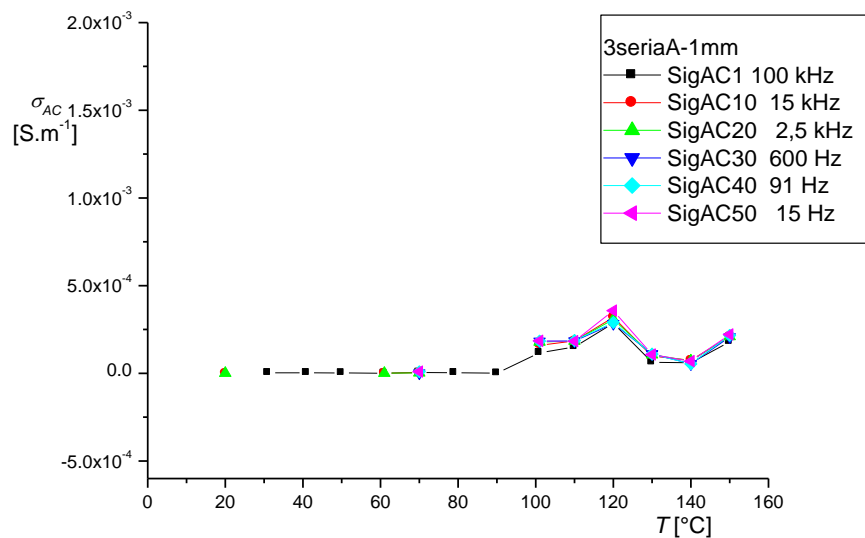
Obr. 34 Frekvenční závislost ztrátového činitele vzorků 3. série A-1 mm, B-1,4 mm, C-2 mm stanovené při teplotě 100°C

Na obr. 34 jsou prezentovány frekvenční závislosti ztrátového činitele vzorků A - 1 mm, B - 1,4 mm a C - 2 mm. Tvar závislosti v případě vzorku A - 1 mm ukazuje, že na tomto vzorku je transport elektrického náboje uskutečňovaný zejména vodivým spojením přes vlákna tkaniny. Snížení hodnoty ztrátového činitele u vzorků B - 1,4 mm a C - 2 mm naznačuje výrazný projev elektricky málo vodivé fáze polymeru, který přerušuje vodivé kontakty zajišťované prostřednictvím vodivé tkaniny a vodivých částic. Tvar závislosti při těchto vzorcích je ovlivněn i výskytem další vodivé fáze ve formě částic v objemu kompo-

zitu. Jejich přítomnost na frekvenčních závislostech ztrátového činitele vzorků B - 1,4 mm a C - 2 mm projevuje výskytem zvýšení hodnoty ztrátového činitele v užším intervalu frekvencí obr. 35. Tento interval frekvencí je teplotně závislý.

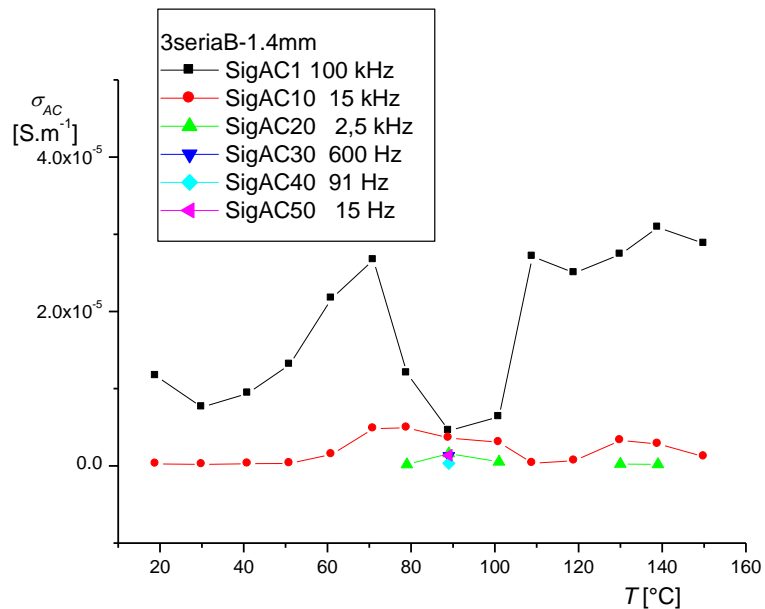


Obr. 35 Detail frekvenční závislosti střídavé konduktivity vzorku 3 série B-1.4 mm stanovená při teplotě 100°C

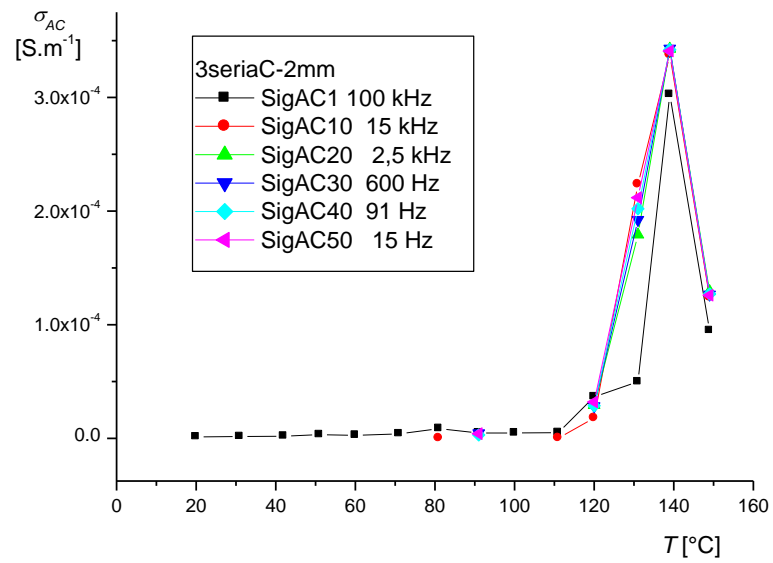


Obr. 36 Teplotní závislost střídavé konduktivity pro vzorek 3. série A-1 mm, při měřících frekvencích 100 kHz, 15 KHz, 2,5 kHz, 600 Hz, 91 Hz, 15 Hz

Teplotní závislost elektrické konduktivity obr. 36 vzorku A - 1 mm naměřená při různých frekvencích je stabilní do teploty 90°C přičemž není prakticky ovlivněna použitou frekvencí měření. Frekvenční nezávislost a malá teplotní citlivost opět poukazují na dominantní vliv uhlíkové výztuže. Část průběhu naměřeného nad teplotou 90°C je pravděpodobně možné spojit s dodatečnými změnami v matici kompozitu. (Např. doběh chemických reakcí). U vzorků B - 1,4 mm obr. 37 a C - 2 mm obr. 38 jsou výsledky měření teplotních závislostí elektrické konduktivity, vzhledem k faktu významného dopadu zastoupení polymerní matrice, zatížené vysokým rozptylem hodnot. Pro odstranění tohoto jevu by bylo vhodné provést měření s využitím vlastní elektrody. Použití vlastní elektrody pro vzorky B, C zkreslí porovnání výsledků se vzorkem A.



Obr. 37 Teplotní závislost střídavé konduktivity pro vzorek 3. série B-1,4 mm, při měřících frekvencích 100 kHz, 15 kHz, 2,5 kHz, 600 Hz, 91 Hz, 15 Hz



Obr. 38 Teplotní závislost střídavé konduktivity pro vzorek 3. série C-2 mm, při měřících frekvencích 100 kHz, 15 kHz, 2,5 kHz, 600 Hz, 91 Hz, 15 Hz

8 MĚŘENÍ TEPELNÉ VODIVOSTI

Měření tepelné vodivosti probíhalo na přístroji založeném na bezkontaktně automatickém měření tepelné, teplotní vodivosti a měrné tepelné kapacity. Způsob měření spočíval v určení tepelné, teplotní vodivosti a měrné tepelné kapacity na základě poklesu teploty vzorku ochlazovaném převážně v nekonjunktivním režimu. Tato metoda má relativně vysokou přesnost a široké rozpětí pro použití materiálů. Za krátký čas cca 10 min jsme schopni naměřit výsledky a systém funguje plně automaticky. Výhodou je použití vzorků o malých rozměrech o obsahu 1 cm^2 a tloušťce 1-2 mm.

Modelové představy měření vychází z teoretických a matematických východisek.

V metodě soustředěné tepelné kapacity se předpokládá:

- Teplotní gradienty v tělese lze zanedbat
- V tělese neexistují žádné vnitřní zdroje tepla
- Přestup tepla ze vzorku do okolí je kombinací konvektivní a radiačního prostupu tepla
- Teoretická časová závislost teploty je ve tvaru (14).

$$y = dT_{max} \exp\left(\frac{-t}{\tau}\right) + T_{amb} \quad (14)$$

- Relaxační čas lze vyjádřit vztahem (15).

$$\tau = \frac{(\rho c_p L)}{2h} \quad (15)$$

- Tepelnou vodivost lze vyjádřit vztahem (16).

$$k = \alpha \rho c_p \quad (16)$$

- Biotovo číslo (17) je menší než 0,1.

$$Bi = \frac{hL}{2k} \quad (17)$$

h - celkový koeficient prostupu tepla do okolí (konvektivní + radiační)

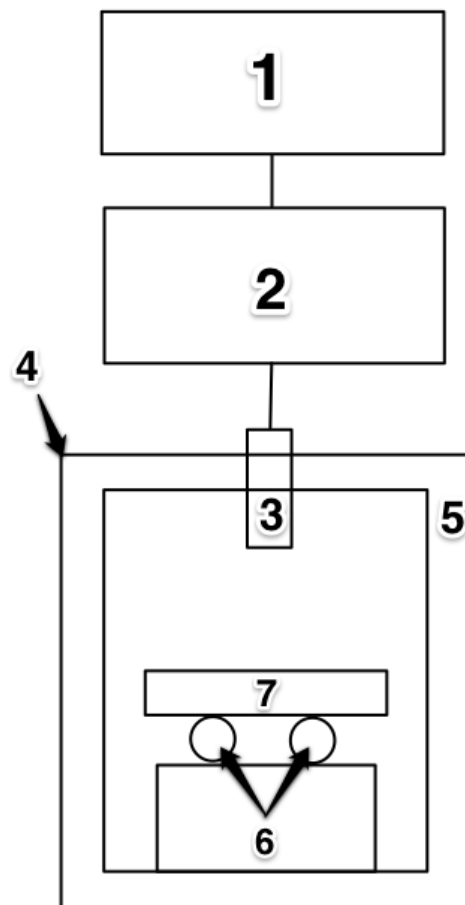
L - tloušťka vzorku

c_p - tepelná kapacita vzorku

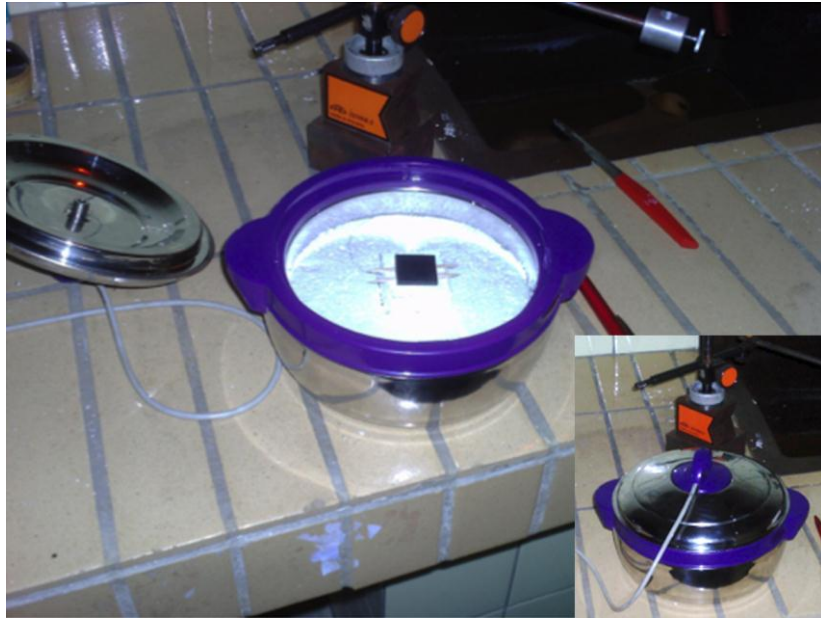
k - tepelná vodivost vzorku

α - teplotní vodivost vzorku

Vzorky musí být jemně obroušené, případně leštěné a tloušťka vzorku musí být co nejnižší s ohledem na tepelnou vodivost materiálu (čím nižší vodivost tím menší tloušťka), proto lze očekávat u vyšší tloušťky našeho vzorku rozdílné hodnoty, které ale nemusí jen záviset na tomto parametru. Povrch vzorků musí být nastříkán matným černým lakem pro zajištění dostatečné emisivity.



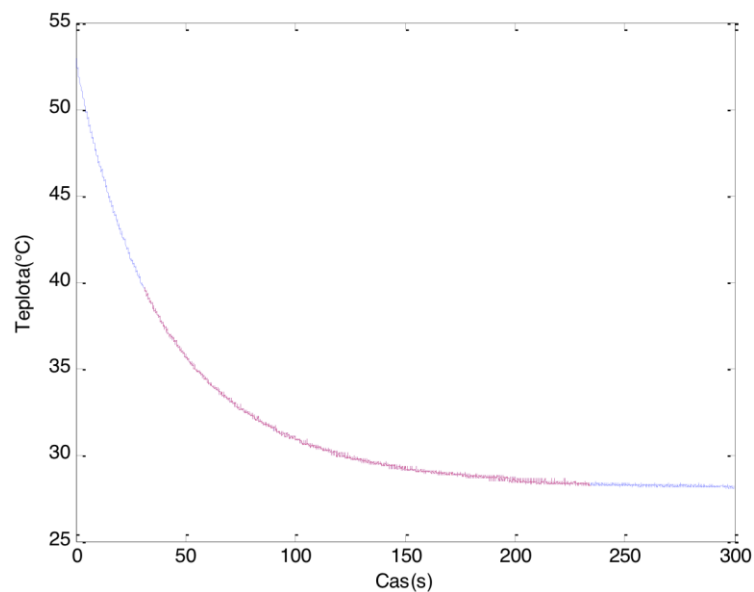
Obr. 39 Schéma přístroje: 1- PC, 2 Elektronika, 3 - Pyrosenzor s citlivostí 0,1 °C, 4 - Adiabatická komora, 5 - Tepelná izolace, 6 - Podložky na uložení vzorku, 7 - Vzorek



Obr. 40 Adiabatická komora pro uložení vzorku s izolovanou stěnou

Postup při měření:

Vzorek se zahřeje v termostatu nad teplotu okolí, obvykle na cca 50°C . Poté se vzorek vloží do adiabatické komory, která se následně uzavře. Pomocí PC se spustí automatické stahování časových změn teploty vzorku, které se předem nastaví na 5-10 minut. Naměřené hodnoty nám dají ochlazovací graf. Software za pomoci lineární regrese vyhodnocuje křivku a dosadí proměnné do rovnic, ze kterých určujeme hodnoty tepelné, teplotní a měrné tepelné kapacity. [35]



Obr. 41 Příklad teplotní křivky ochlazení vzorku

Vytvoření proměnných času t teploty T z naměřených dat (textový soubor o 2 sloupcích čas - teplota) - **modrá křivka**. Seřiznutí závislosti teplota - čas - **červená křivka**, ze kterého získáme potřebné hodnoty pro výpočet tepelných vlastností.

Tab. 17 Vyhodnocení tepelné vodivosti bezkontaktní metoda

Vzorek tloušťky	Tepelná vodivost	Měrná tepelná kapacita	Tepelná difuzivita
[mm]	[W/m.K]	[J/kg.K]	[m ² /s]
1	0,84	1220	3,99.10 ⁻⁷
	0,87	1275	4,0.10 ⁻⁷
1,4	0,61	1112	4,0.10 ⁻⁷
	0,58	1100	4,0.10 ⁻⁷
2	0,76	1470	3,99.10 ⁻⁷
	0,70	1425	3,99.10 ⁻⁷

Výsledky tab. 17 ukazují, že u nabývajících tloušťek sledujeme mírný pokles tepelné vodivosti, co mohou způsobovat malé uzavřené bubliny, které hůře předávají teplo a sdílejí teplo obr. 22, 23, 24. a zvětšující se poměr epoxidové matrice s rostoucí tloušťkou.

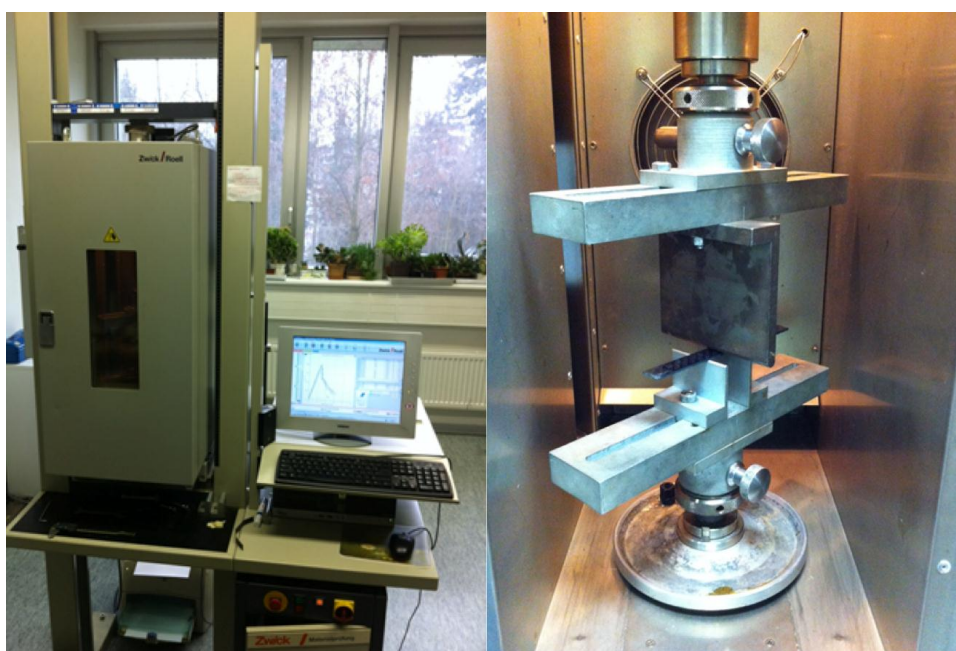
Tab. 18 Porovnání naměřených hodnoty s tabulkovými tepelných vlastností

Materiál Epoxid+Uhlík hodnoty	Tloušťka [mm]	Hustota [kg/m ³]	Koef. Přest. Tep- la [W/m ² .K]	Měrná tepelná kapacita [J/kg.K]	Tepelná difuzivita [m ² /s]	Tepelná vodivost [W/m.K]
Naměřené	1	1470,46	27,15	1491	4,049.10 ⁻⁷	0,855
Tabulkové [6]	1	1510	28	1450	4.10 ⁻⁷	0,8

Tato metoda přináší velmi přesné výsledky, které se liší maximálně o 10% v porovnání s tabulkovými hodnoty. Při srovnání naměřených výsledků s tabulkovými hodnotami dosahujeme velmi přesný výsledků tab. 18. Tabulkové hodnoty získány na základě knihy názvu uvedeném pod odkazem [6].

9 MĚŘENÍ MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ OHYBEM

Zkušební vzorky jsou položeny na podpěry a krátkodobě zatěžovány za daných podmínek tří-bodovým ohybem až do porušení – nalomení. Zkouška byla provedena na zkušebním stroji ZWICK ROELL 1456 s teplotní komorou (-80 °C/+250 °C) za normy ČSN EN ISO 14125. Tato norma vychází z ČSN EN ISO 178 a je určena pro vlákny vyztužené plastové kompozity. Měření probíhalo při pokojové teplotě 22 °C a při zvýšené teplotě 60 °C. Pro reálné sledování průběhu zkoušek a jejich výsledky je k dispozici počítač se softwarem Test Expert II, který je součástí přístroje.



Obr. 42 Zkušební stroj Zwick Roell 1456 s teplotní komorou při 60 °C

Tab. 19 Technické specifikace přístroje Zwick Roell 1456

Technické specifikace přístroje Zwick Roell 1456	
Maximální zkušební síla	20 kN
Strojová výška	1284 mm
Celková výška	2012 mm
Celková šířka	630 mm
Šířka pracovního prostoru	420 mm
Hmotnost	150 kg
Max rychlost posuvu příčnicku	800 mm/min
Extenzometry pro měřené protažení	macro / přídatný

9.1 Statistické vyhodnocení

- **Aritmetický průměr \bar{x}** - hodnota popisující soubor mnoha hodnot. Je to součet všech hodnot vydělený jejich počtem.
- **Medián M** - polovina hodnot výběrového (základního) souboru leží pod resp. nad mediánem. Soubor je však nutno uspořádat vzestupně (sestupně). V souborech o sudém počtu členů je za medián považována hodnota v půli intervalu mezi dvěma prostředními hodnotami.
- **Směrodatná odchylka s** - průměrná hodnota, o kterou se průměrně liší naměřené hodnoty od aritmetického průměru.
- **Variační rozpětí R** - rozdíl mezi minimální a maximální hodnotou výběrového (základního) souboru.
- **Minimum** - x_{MIN} minimální hodnota z naměřených dat.
- **Maximum** - x_{MAX} maximální hodnota z naměřených dat.

9.2 Hodnoty měření zkoušky ohybem

Měření hodnot začalo bez zatěžující síly na začátku, takže od síly 0 N. Průběh zkoušky probíhal rychlostí 1 mm/min. Po dosažení hodnoty modulu pružnosti v ohybu, zkušební rychlost se zvýšila na 10 mm/min a tato hodnota setrvala až do konce měření. Vzorokly měly rozměry 100 mm x 15 mm a tloušťku podle zvoleného vzorku A – 1 mm, B – 1,4 mm a C – 2 mm,

V programu TextXpert II byly získány grafy závislosti napětí σ [MPa] na poměrné deformaci ϵ [%]. Dále program vyhodnotil průměrnou hodnotu x , směrodatnou odchylku s . Měření proběhlo za pokojové teploty 22 °C a při zvýšené teplotě 60 °C.

Tab. 20 Naměřené hodnoty ohybové zkoušky za okolní teploty 22°C

Vzorek tloušťky	E	σ_{\max}	$\epsilon_{F_{\max}}$	σ_B	ϵ_B	$W\sigma_{\max}$
[mm]	[MPa]	[MPa]	[%]	[MPa]	[%]	[N.mm]
1	51500	955	2,0	686	2,4	424,45
	48000	1040	2,3	811	2,4	554,09
	66100	1130	2,3	796	2,3	438,52
	50500	920	2,0	247	3,0	387,45
	45600	914	1,7	224	3,5	446,34
	65100	1070	2,0	817	2,4	431,77
	70700	1220	2,1	806	2,4	488,96
	54700	963	1,9	738	2,4	366,42
	52900	966	1,9	783	2,3	354,28
	63300	1110	1,8	795	2,3	385,73
1,4	40400	792	1,9	202	2,1	688,44
	46700	890	1,8	1040	2,4	549,05
	38700	847	2,0	226	2,3	645,89
	57300	998	1,7	184	2,1	621,14
	41600	896	2,0	897	2,0	579,5
	54600	982	1,8	1040	1,9	645,13
	45700	876	1,9	1160	2,9	616,22
	54300	995	1,8	663	1,8	588,24
	65400	1220	1,8	217	2,1	624,38
	57600	1040	1,9	222	2,5	653,61
2	38300	821	1,8	652	2,9	647,34
	37300	829	2,2	259	2,2	811,93
	42500	855	1,7	227	2,5	974,49
	47600	896	1,8	294	2,7	860,06
	41200	829	2,0	896	2,0	640,34
	32400	879	1,8	840	1,8	832,55
	39200	822	1,8	204	1,8	832,38
	37900	823	1,6	870	1,8	771,77
	44600	847	1,7	394	3,0	796,37
	45400	823	1,7	208	2,4	718,5

Tabulka 20 znázorňuje naměřené hodnoty jednotlivých vzorků ohybové zkoušky za okolní teploty 22°C. Každé měření proběhlo 10x u jedné zvolené tloušťky kompozitního systému. V následujících tabulkách 21, 22 a 23 jsou tyto měření vyhodnocena.

Tab. 21 Vyhodnocení hodnot zkoušky ohybem pro vzorek tloušťky 1 mm při 22°C

Tloušťka 1 mm	E	σ_{\max}	$\varepsilon_{F\max}$	σ_B	ε_B	$W\sigma_{\max}$
n = 10	[MPa]	[MPa]	[%]	[MPa]	[%]	[N.mm]
\bar{x}	56840	1028,8	2,00	670,3	2,54	427,8
<i>M</i>	53800	1003,0	2,00	789,0	2,40	428,11
<i>s</i>	8899,3	102,2	0,194	232,6	0,395	60,32
<i>R</i>	25100	306	0,6	593	1,2	199,81
x_{\min}	45600	914	1,7	224	2,3	354,28
x_{\max}	70700	1220	2,3	817	3,5	554,09

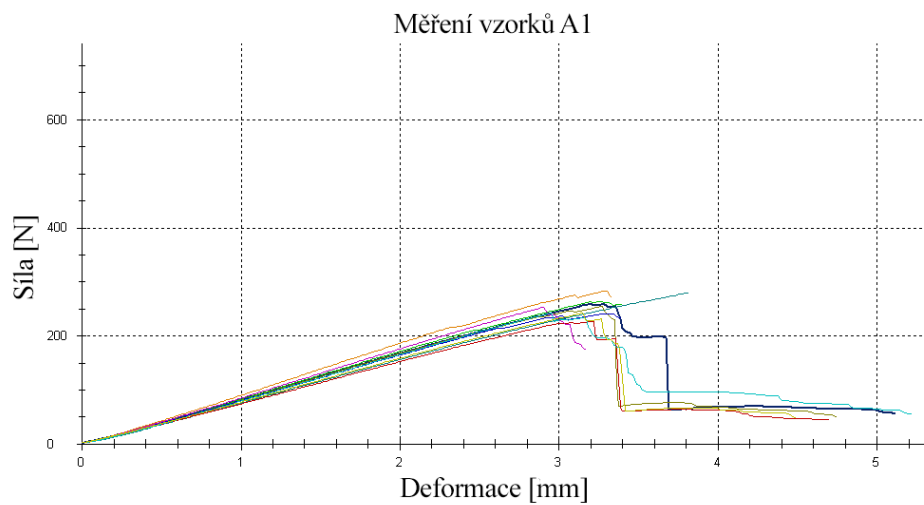
Tab. 22 Vyhodnocení hodnot zkoušky ohybem pro vzorek tloušťky 1,4 mm při 22°C

Tloušťka 1,4 mm	E	σ_{\max}	$\varepsilon_{F\max}$	σ_B	ε_B	$W\sigma_{\max}$
n = 10	[MPa]	[MPa]	[%]	[MPa]	[%]	[N.mm]
\bar{x}	50230	953,6	1,86	585,1	2,21	621,16
<i>M</i>	50500	939,0	1,85	444,5	2,10	622,76
<i>s</i>	8863,9	121,9	0,097	415,2	0,325	40,58
<i>R</i>	26700	428	0,3	976	1,1	139,39
x_{\min}	38700	792	1,7	184	1,8	549,05
x_{\max}	65400	1220	2	1160	2,9	688,44

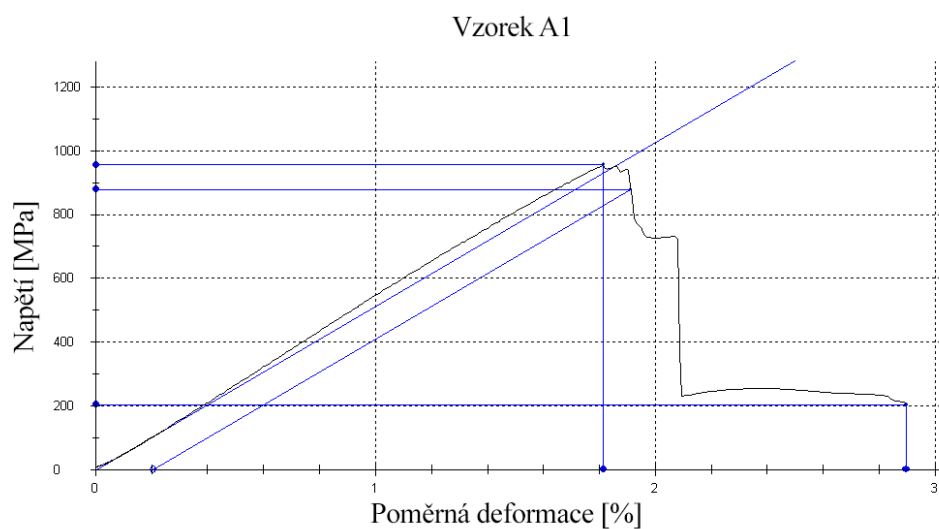
Tab. 23 Vyhodnocení hodnot zkoušky ohybem pro vzorek tloušťky 2 mm při 22°C

Tloušťka 2 mm	E	σ_{\max}	$\varepsilon_{F\max}$	σ_B	ε_B	$W\sigma_{\max}$
n = 10	[MPa]	[Mpa]	[%]	[Mpa]	[%]	[N.mm]
\bar{x}	40640	842,4	1,81	484,4	2,31	788,57
<i>M</i>	40200	829,0	1,80	344,0	2,30	804,15
<i>s</i>	4529,7	26,6	0,173	296,1	0,461	100,69
<i>R</i>	15200	75	0,6	692	1,2	334,15
x_{\min}	32400	821	1,6	204	1,8	640,34
x_{\max}	47600	896	2,2	896	3	974,49

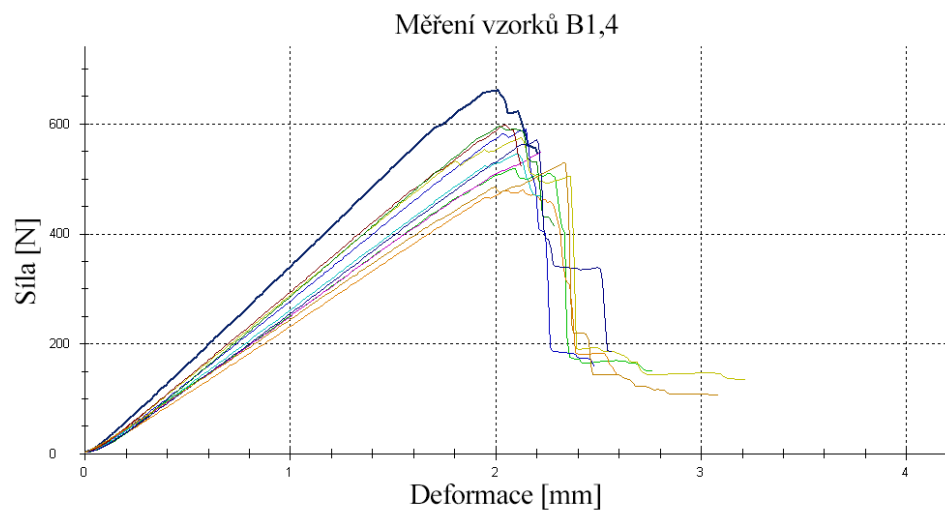
Z naměřených hodnot tab. 21, tab. 22 a tab. 23 je patrné, že při zvyšující se tloušťce vzorku prepreg uhlík / epoxid, dochází ke snížení modulu pružnosti v ohybu E , což má za následek růst poměru plnění epoxidové matrice k poměru uhlíkové výztuže. Zkrátka čím více vrstev prepregu použijeme, tak spolu s objemem výztuže bude růst také poměr plnění epoxidové matrice, které způsobuje snížení pevnosti. Spolu se zvyšující se tloušťkou roste síla, které je potřeba k porušení vzorku, což se odrazí na vykonané práci W_{max} .



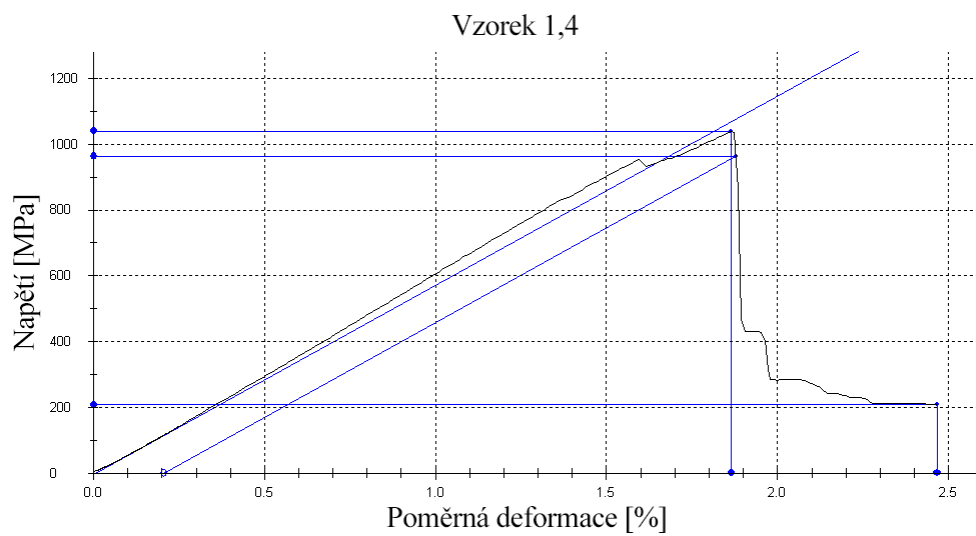
Obr. 43 Průběhy ohybové zkoušky vzorku při teplotě 22 °C o tloušťce 1 mm závislost síly na deformaci



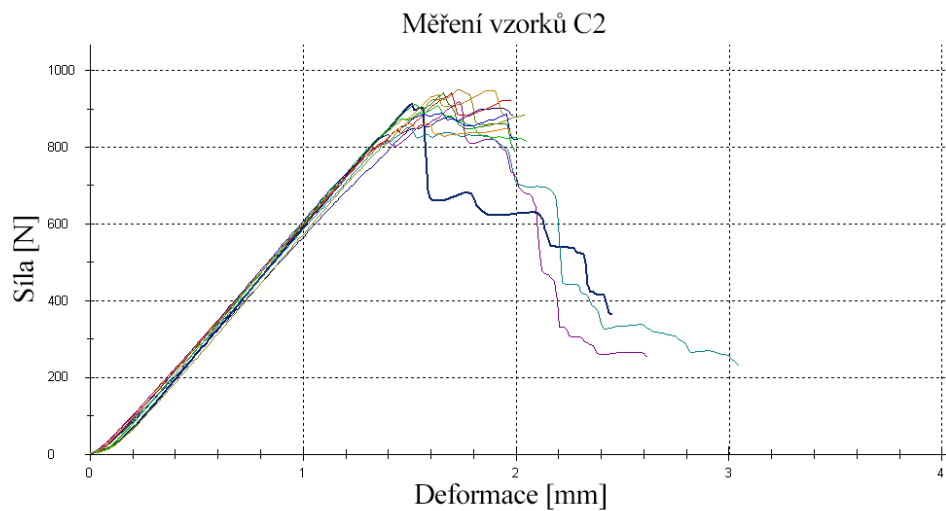
Obr. 44 Průběh napětí na poměrné deformaci pro vzorek o tloušťce 1 mm



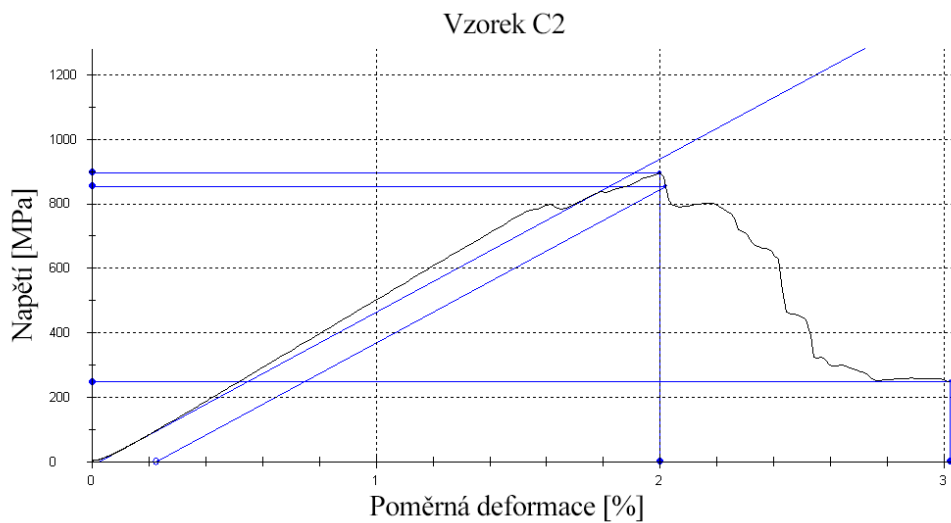
Obr. 45 Průběhy ohybové zkoušky vzorku při teplotě 22 °C o tloušťce 1,4 mm závislost síly na deformaci



Obr. 46 Průběh napětí na poměrné deformaci pro vzorek o tloušťce 1,4 mm



Obr. 47 Průběhy ohybové zkoušky vzorku při teplotě 22 °C o tloušťce 2 mm závislost síly na deformaci



Obr. 48 Průběh napětí na poměrné deformaci pro vzorek o tloušťce 2 mm

Grafy na obr. 41, 43, 45 znázorňují celkový průběh ohybové zkoušky všech vzorků najednou při okolní teplotě 22 °C a žádný z naměřených vzorků nevykazoval vychýlené hodnoty. Grafy 42, 44, 46 představují jeden ze zástupců naměřených vzorků, lze si všimnout poklesu napětí a síly při porušení jednotlivých vrstev.

Stejně jako při pokojové teplotě 22 °C probíhalo obdobné měření vzorků při 60 °C. Měření vycházelo ze stejných parametrů pro měření, jak v předchozím měření bez před zatěžující síly a rychlostí zkoušek. Pro zvýšení teploty bylo třeba použít teplotní komoru a vytemperovat na měřicí prostor i se vzorky na 60 °C.

Tab. 24 Naměřené hodnoty ohybové zkoušky za zvýšené teploty 60°C

Vzorek tloušťky	E	σ_{\max}	$\epsilon_{F\max}$	σ_B	ϵ_B	$W\sigma_{\max}$
[mm]	[MPa]	[MPa]	[%]	[MPa]	[%]	[N.mm]
1	42300	712	1,6	207	3,4	262,46
	45700	702	1,5	140	3,7	235,9
	38500	738	2	147	3,5	357,69
	44100	743	1,7	149	3,7	286,73
	42400	725	1,7	145	4,1	305,58
	46000	731	1,6	192	3,3	270,37
	35200	635	1,9	135	3,4	329,86
	35100	600	1,8	120	3,7	291,73
	34800	591	1,8	118	4	303,54
1,4	38600	615	1,6	123	3,4	380,83
	38800	607	1,5	121	4,2	339,25
	33700	635	1,7	205	3,1	407,05
	30900	623	1,7	125	3,9	384,97
	36100	590	1,7	118	3,8	384,15
	30300	643	1,9	193	3,4	453,75
	37500	601	1,7	120	3,7	392,04
	34900	590	1,7	223	3,7	366,59
	34500	648	1,8	154	3,9	414,74
2	23000	556	1,8	130	4,8	463,89
	27400	570	1,8	114	5	491,57
	26300	547	1,8	259	3,5	467,43
	32300	491	2,4	234	3,9	765,88
	24500	540	1,8	155	4,8	475,92
	32200	522	1,8	145	4,5	519,24
	24700	507	1,9	101	6	508,69
	23100	543	1,8	175	4,7	482,8
	23000	509	1,6	186	4,6	393,24

Tabulka 24 znázorňuje naměřené hodnoty navrženého kompozitního systému uhlík + epoxid ohybové zkoušky za zvýšené teploty 60°C. Pro každé měření bylo použito 9 vzorků. V následujících tabulkách 25, 26 a 27 jsou tyto měření vyhodnocena.

Tab. 25 Vyhodnocení hodnot zkoušky ohybem pro vzorek tloušťky 1 mm při 60°C

Tloušťka 1 mm	E	σ_{\max}	$\varepsilon_{F\max}$	σ_B	ε_B	$W\sigma_{\max}$
n = 9	[MPa]	[MPa]	[%]	[MPa]	[%]	[N.mm]
\bar{x}	40456	686,3	1,7	150,3	3,6	293,76
<i>M</i>	42300	712,0	1,7	145,0	3,7	291,73
<i>s</i>	4620,9	60,7	0,158	30,2	0,274	36,32
R	11200	152	0,5	89	0,8	121,79
x_{\min}	34800	591	1,5	118	3,3	235,9
x_{\max}	46000	743	2	207	4,1	357,69

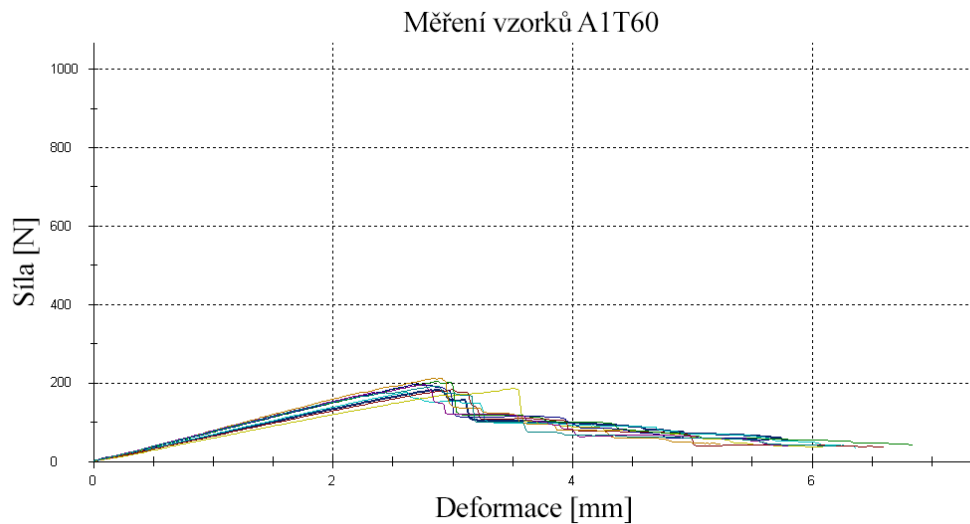
Tab. 26 Vyhodnocení hodnot zkoušky ohybem pro vzorek tloušťky 1,4 mm při 60°C

Tloušťka 1,4 mm	E	σ_{\max}	$\varepsilon_{F\max}$	σ_B	ε_B	$W\sigma_{\max}$
n = 9	[MPa]	[MPa]	[%]	[MPa]	[%]	[N.mm]
\bar{x}	35033	616,9	1,7	153,6	3,68	391,49
<i>M</i>	34900	615,0	1,7	125,0	3,70	384,97
<i>s</i>	3076,1	21,8	0,112	42,2	0,331	32,05
R	8500	58	0,4	105	1,1	114,5
x_{\min}	30300	590	1,5	118	3,1	339,25
x_{\max}	38800	648	1,9	223	4,2	453,75

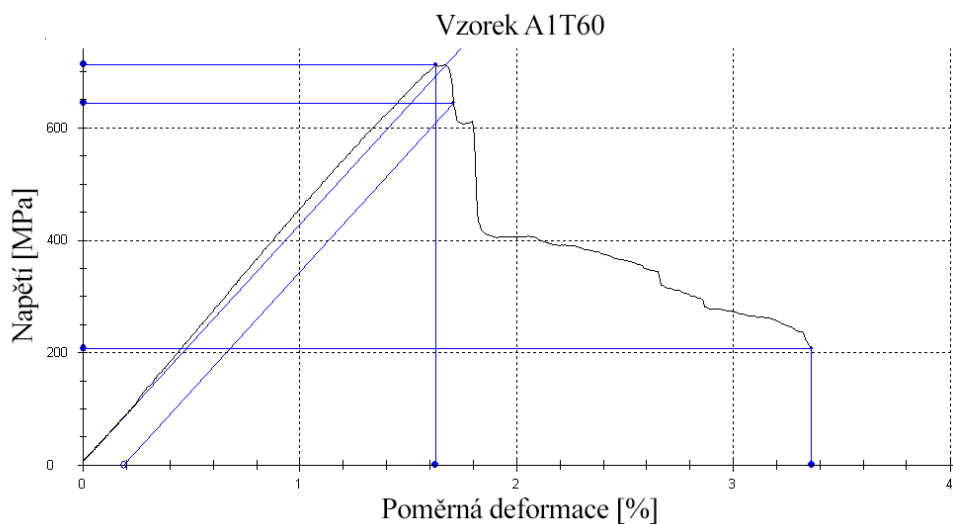
Tab. 27 Vyhodnocení hodnot zkoušky ohybem pro vzorek tloušťky 2 mm při 60°C

Tloušťka 2 mm	E	σ_{\max}	$\varepsilon_{F\max}$	σ_B	ε_B	$W\sigma_{\max}$
n = 9	[MPa]	[MPa]	[%]	[MPa]	[%]	[N.mm]
\bar{x}	26278	531,7	1,9	166,6	4,64	507,63
<i>M</i>	24700	540,0	1,8	155,0	4,70	482,80
<i>s</i>	3705,3	25,9	0,219	53,1	0,698	103,27
R	9300	79	0,8	158	2,5	372,64
x_{\min}	23000	491	1,6	101	3,5	393,24
x_{\max}	32300	570	2,4	259	6	765,88

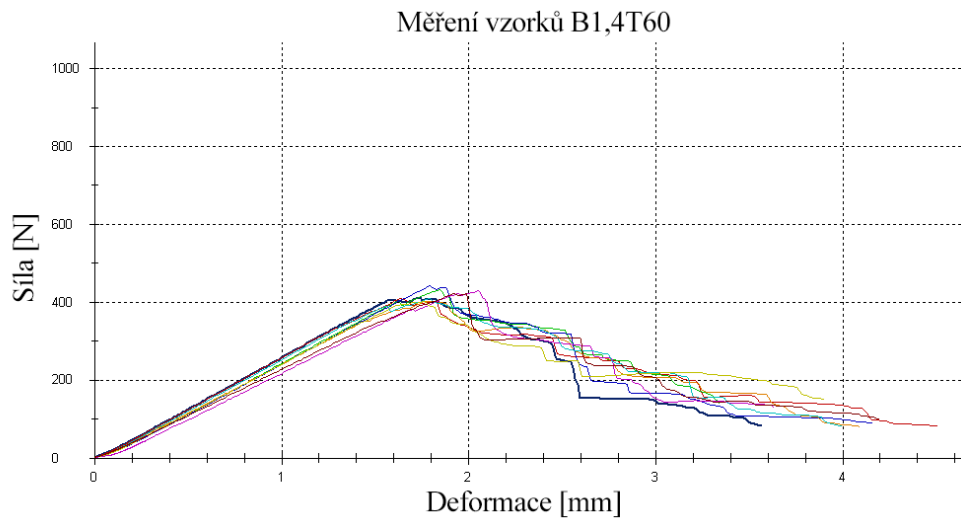
Měření ohybových vlastností při zvýšené teplotě 60 °C tab. 25, 26, 27 přináší snížení modulu pevnosti a tím i mez pevnosti v ohybu. Naopak k větší deformaci při porušení dochází při zvýšené teplotě, což má za následek změnu křehkosti naměřených vzorků. V porovnání se vzorky měřených za okolní teploty 22 °C má toto měření menší rozpětí hodnot.



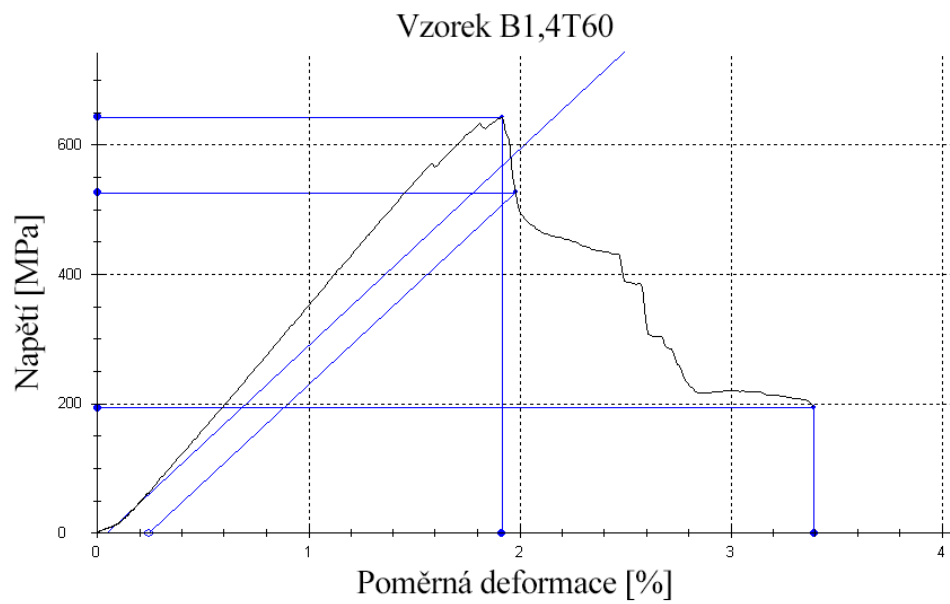
Obr. 49 Průběhy ohybové zkoušky vzorku při teplotě 60 °C o tloušťce 1 mm závislost síly na deformaci



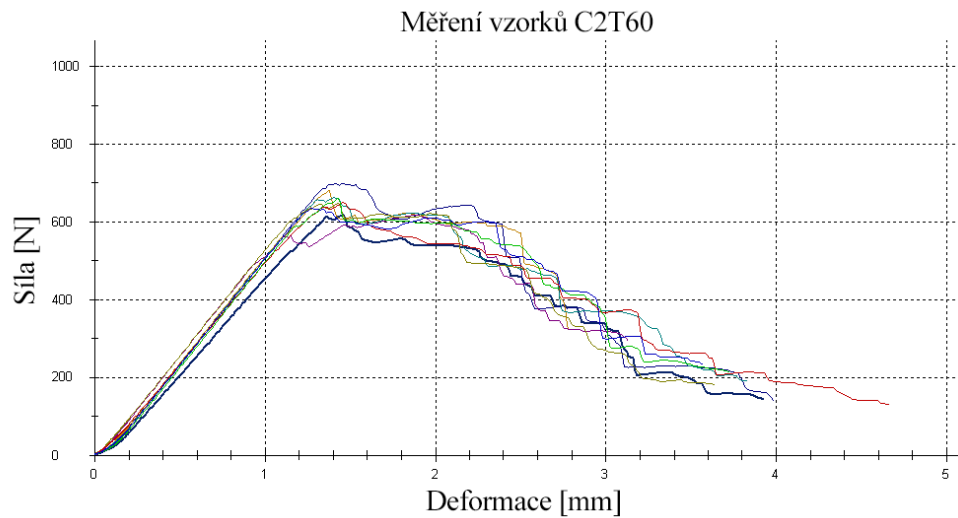
Obr. 50 Průběh napětí na poměrné deformaci pro vzorek o tloušťce 1 mm



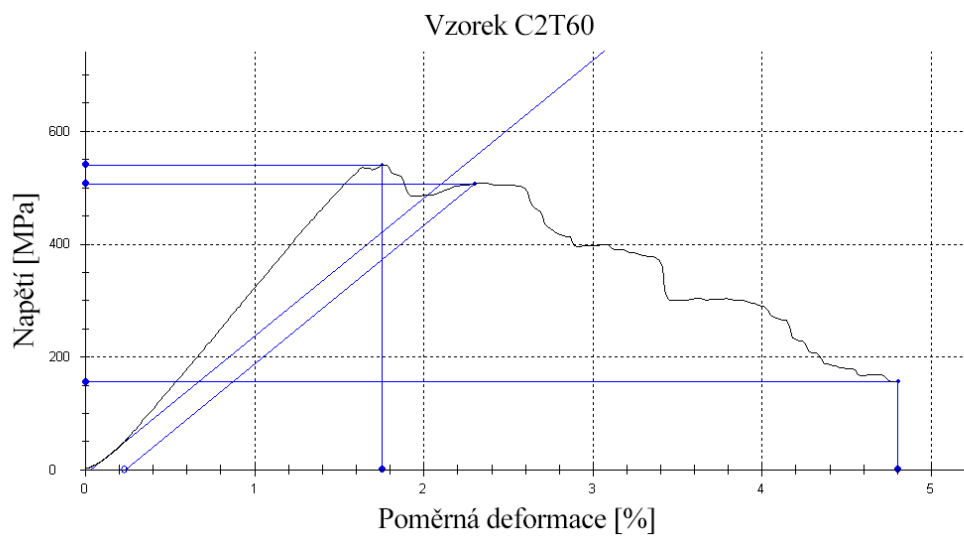
Obr. 51 Průběhy ohybové zkoušky vzorku při teplotě 60 °C o tloušťce 1,4 mm závislost síly na deformaci



Obr. 52 Průběh napětí na poměrné deformaci pro vzorek o tloušťce 1,4 mm

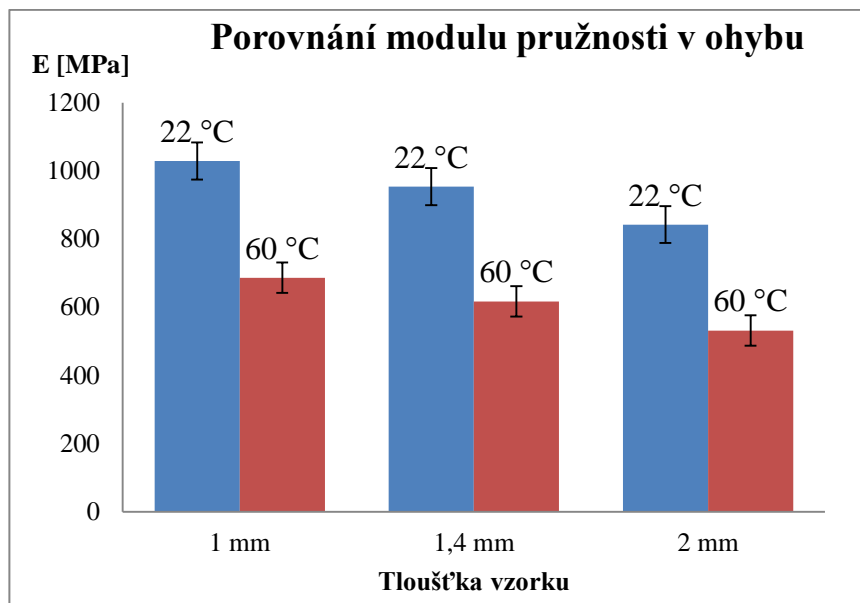


Obr. 53 Průběhy ohybové zkoušky vzorku při teplotě 60 °C o tloušťce 2 mm závislost síly na deformaci



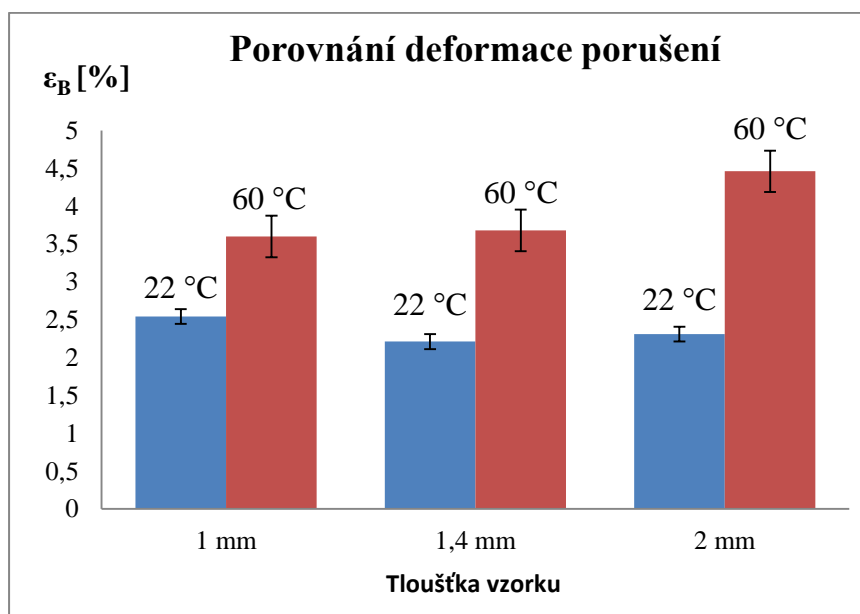
Obr. 54 Průběh napětí na poměrné deformaci pro vzorek o tloušťce 2 mm

Na grafech obr. 47, 49, 51 opět znázorňují celkový průběh ohybové zkoušky všech vzorků najednou při zvýšené teplotě 60 °C. Ani jeden ze vzorků neprojevoval výraznější vychýlení a grafy 48, 50, 52 znázorňují jednoho z vybraných zástupců naměřených vzorků.



Obr. 55 Porovnání modulu pevnosti v ohybu při 22 °C a 60 °C

Porovnání výsledků měření při teplotě 22 °C a 60 °C ukazuje graf obr. 50. Při zvýšených teplotách dochází na každém vzorku k poklesu modulu pružnosti v ohybu E . Naopak u zvýšené teploty se deformace při porušení zvětšuje obr. 53. Tyto poklesy a nárůsty v procentech znázorňuje tab. 28. Procentový růst poklesu modulu pružnosti stoupá s narůstající tloušťkou a to má za následek zvyšující se objem plnění epoxidové matrice. Naopak u zvýšené teploty se deformace při porušení zvyšuje obr. 54.



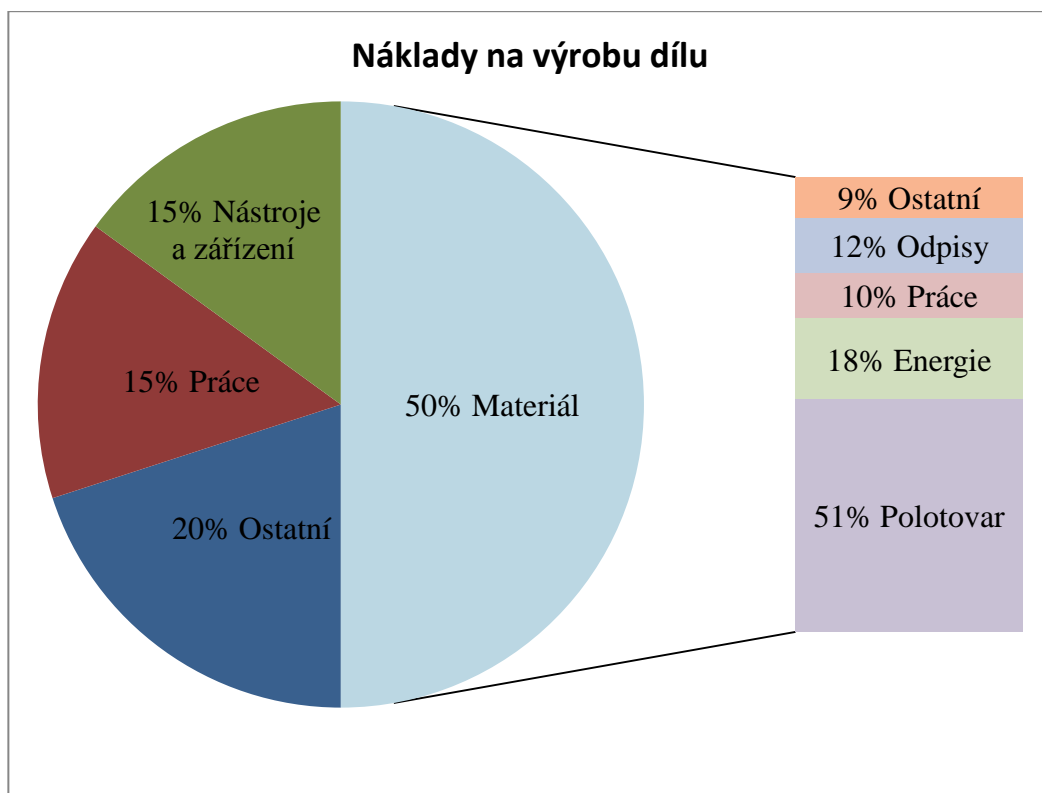
Obr. 56 Porovnání deformace porušení při 22 °C a 60 °C

Tab. 28 Pokles hodnot naměřených při zvýšené teplotě

Typ vzorku	E [MPa]	E [MPa]	Pokles průměrných hodnot při 60 °C
	při 22 °C	při 60 °C	
Vzorek A – 1 mm	56840	40456	29%
Vzorek B – 1,4 mm	50230	35033	30%
Vzorek C – 2 mm	40640	26278	35%
Typ vzorku	ϵ_B [%]	ϵ_B [%]	Nárůst průměrných hodnot při 60 °C
	při 22 °C	při 60 °C	
Vzorek A – 1 mm	2,54	3,6	42%
Vzorek B – 1,4 mm	2,21	3,68	67%
Vzorek C – 2 mm	2,31	4,64	101%

10 EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ

Do ekonomického hodnocení zahrnujeme několik faktorů, které souvisí s konečnými náklady a to jsou například náklady na materiál, práci, energii, provoz, nástroje a odpisy vzniklé během výroby. Konkrétně náklady na pracovní sílu se budou měnit s krajem, kde se zrovna výroba nachází. Ve Zlínském kraji činí na dělnickou práci průměrně 193 korun náklad na 1 odpracovanou hodinu. Ze získaných hodnot sestavují relativní náklady, co je potřeba pro výrobu dílu obr 55. Celou polovinu nákladů tvoří materiál v našem případě prepreg epoxid + uhlík a to je důsledek nákladné výroby uhlíkových vláken. Zpracování dochází při zvýšené teplotě 130 - 150 °C, což vysvětluje téměř 20% spotřebované energie. Vzhledem k tomu, že proces probíhá ve velké míře automaticky, takže práce představuje pouze 10%. Asi 12% tvoří odpisy například nevyužití celého plátna prepregu při řezání. Více než polovinu nákladů představuje samotný prepreg, kde jeho cena je závislá na objemu vláknové výztuže. Mezi ostatní náklady můžeme zahrnout pauzy zaměstnanců, neplánované odstávky stroje a výroby.



Obr. 57 Náklady na výrobu dílu

Tab. 29 Kalkulace spotřeby materiálu

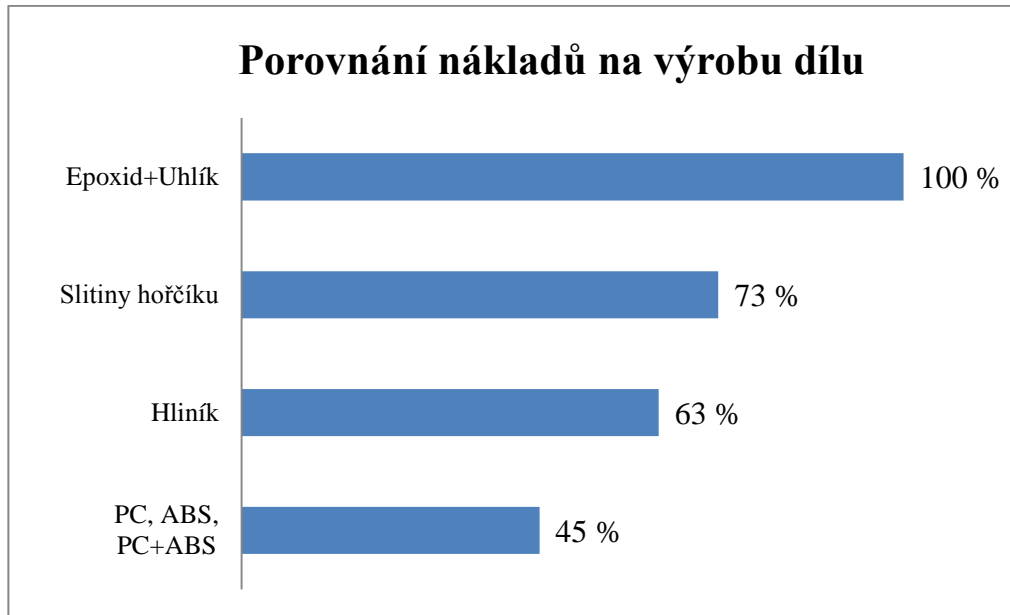
Prepreg 1 m ² = 1000 Kč	Díl 320x220 Tloušťka 1 mm	Díl 320x220 Tloušťka 1,4 mm	Díl 320x220 Tloušťka 2 mm
Spotřeba materiálu	0,29 m ²	0,43 m ²	0,57 m ²
Cena	290 Kč	430 Kč	570 Kč

U kalkulace spotřeby materiálu připočítávám k celkové spotřebě 5 % na víc ke zvoleným rozměrům dílu tab. 29.

Tab. 30 Kalkulace výrobních nákladů

Výrobní náklady		Díl 320x220 Tloušťka 1 mm	Díl 320x220 Tloušťka 1,4 mm	Díl 320x220 Tloušťka 2 mm
Materiál	Polotovary	290 Kč	430 Kč	570 Kč
	Energie	103 Kč	151 Kč	202 Kč
	Práce	57 Kč	86 Kč	112 Kč
	Odpisy	69 Kč	102 Kč	135 Kč
	Ostatní	52 Kč	78 Kč	101 Kč
Výrobní proces	Nástroje a zařízení	172 Kč	255 Kč	336 Kč
	Práce	172 Kč	255 Kč	336 Kč
	Ostatní	229 Kč	339 Kč	448 Kč
Celkem		1144 Kč	1696 Kč	2240 Kč

Z celkových cen vidíme, že při narůstající tloušťce se zvyšuje cena a ta se odrazí na spolu závislých nákladech jednotlivých částí. Při porovnání výroby dílu o tloušťce 1 mm a 2 mm dojde k nárůstu cen za práci spojenou s přípravou vzorku, ale také dalších částí, kde musíme vynaložit větší úsilí pro výrobu tab. 30.



Obr. 58 Porovnání nákladů na výrobu dílu

Graf obr. 56 ukazuje jednotlivé ceny stejného dílu vyrobeného z jiného materiálu. Náš testovaný materiál představuje 100% nákladů, ze kterých se odvíjí další materiály. Ve výsledku budou materiály epoxid + uhlík a hliník vykazovat lepší mechanické vlastnosti, jako u slitin hořčíku, PC, ABS a to je důležité brát na vědomí při volbě těchto rozdílných materiálů. U hliníku beru jako velkou nevýhodu snadnost poškrábání povrchu a její značné viditelnosti, spolu s naší navrženou kompozitní strukturou epoxid + uhlík povrch dobře skrývá nečistoty, jako jsou například otisky prstů od každodenního používání.

ZÁVĚR

Tato diplomová práce se zabývá studiem tepelných, elektrických a mechanických vlastností v závislosti na tloušťce kompozitního materiálu epoxid + uhlík s označením HexPly[®] M49 ve formě prepregu vyrobeného lisováním při zvýšené teplotě tzv. technologie crush-core. Další variantou výroby mohou být vakuové lisování a lisování v autoklávu. Při volbě materiálů matrice pro daný uhlíkový kompozitní materiál jsem zvolil epoxidovou pryskyřici, která pro svou tepelnou odolnost je vhodná pro aplikace v elektrotechnice.

V experimentální části jsme vyrobili vzorky o 3 variantách tloušťky (1 mm, 1,4 mm, 2 mm), na nich vykonali měření tepelných, elektrických vlastností a mechanické zkoušky (ohybovou dle normy ČSN EN ISO 14125 při okolní a zvýšené teplotě).

Při mikroskopickém sledování naší navržené skladby kompozitní struktury jde jasně rozeznat ze snímků jednotlivé vrstvy uhlíkové rohože ve struktuře prosycené epoxidovou pryskyřicí. Vrstvy nejsou v celém objemu rovnoměrně rozloženy a dochází ke shluku. Rohože neprokazují žádné vady tvaru například zkroucení a zvlnění. Světlá místa mohou dokazovat výskyt malých vzduchových bublin, které mají určitý vliv na výsledky u našich studií.

Měření elektrických vlastností se zaměřilo na frekvenční závislost střídavé konduktivity, frekvenční závislost ztrátového činitele vzorků a teplotní závislost střídavé konduktivity. V případě malé tloušťky kompozitu (vzorek A o tloušťce 1 mm) je použití výztužné uhlíkové tkaniny dostatečné pro zajištění požadovaných vyšších hodnot elektrické konduktivity, ale u větších tlouštěk připravených vzorků (vzorek B o tloušťce 1,4 mm a vzorek C o tloušťce 2 mm) se projevuje i vliv polymerní matrice na hodnoty elektrické konduktivity a tepelné vodivosti. Z toho důvodu je pro požadované aplikace s cílem dosáhnout vyšší elektrické vodivosti nutné použití vodivých plniv v těchto materiálech. V takovém případě je však nutné sledovat technologii přípravy kompozitu pro zajištění dobré dispergace vodivých částic v objemu polymerní matrice vyztužené uhlíkovou tkaninou.

Problematika tepelných vlastností je zpracována včetně měření součinitele prostupu tepla ve spolupráci s pracovištěm FMMI VSB-TU Ostrava. Konstrukce zařízení bezkontaktního automatického měření tepelné vodivosti a měrné tepelné kapacity tuhých látek a technické řešení je chráněno užitným vzorem. Měření dosahuje velmi přesných výsledků porovnání s tabulkovými hodnotami. Výsledky tepelné vodivosti u vzorku A o tloušťce 1 mm jsou velice přesné a dopouští se pouze 6 % rozdílu tabulkových hodnot. Na vzorcích B o tloušťce 1,4 mm a vzorku C o tloušťce 2 mm sledujeme pokles tepelné vodivosti, který může být

příčinou malých uzavřených vzduchových bublin v objemu, což vede k horšímu předávání tepla a sdílení tepla. Další příčinou je větší podíl matrice v kompozitu, což má za následek pokles tepelné vodivosti.

Trojbodový ohyb přinesl výsledky nejen v podobě grafů a číselných hodnot. Ukázal také chování kompozitu z hlediska vzájemné soudržnosti jednotlivých vrstev. Je zřejmé, že dochází k postupnému narušování po vrstvách. S rostoucí tloušťkou se mění poměr výztuže a matrice, což má za následek pokles meze pevnosti a modulu pružnosti v ohybu u vzorků B o tloušťce 1,4 mm a C o tloušťce 2 mm oproti vzorku A o tloušťce 1 mm. U měření za zvýšené teploty 60 °C se projevuje změna křehkosti, což způsobuje zvýšení deformace při porušení.

Kompozit epoxid + uhlík představuje velké náklady pro výrobu, ale nepochybně představují vhodné řešení v elektrotechnické aplikaci. Jeho nízká hmotnost, ze které dostaneme výborné mechanické vlastnosti oproti jiným doposud používaným materiálům. Tvarová rozmanitost a dobrá tvárnost poskytuje konstruktérům řadu výhod. Věřím, že v průběhu pár let dojde k většímu masovému využití těchto materiálů, co se projeví na snížení nákladů na výrobu.

Tato práce nabízí široký přehled hodnot vztahů k pozitivnímu materiálu a jeho zkoušení, které se mohou jistě doplnit o další srovnání. Uvedené hodnoty poskytují velmi cenné údaje pro budoucí aplikaci těchto materiálů.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] JANOVEC, J. – Cejp, J. – Steidl, J.: *Perspektivní materiály*, Praha, Vydavatelství ČVUT, 2001
- [2] KOŘÍNEK, Z. KOMPOZITY: Historie. [online]. [cit. 2012-11-18]. Dostupné z: <http://www.volny.cz/zkorinek/historie.pdf>
- [3] LAŠ, V.: *Mechanika kompozitních materiálů*. 1. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita, 2004. ISBN 80-7043-273
- [4] BAREŠ, Richard A. *Kompozitní materiály*. 1. vyd. Praha: SNTL, 1988, 325 s.
- [5] JANČÁŘ, J.: *Úvod do materiálového inženýrství kompozitů*, FCH VUT, Brno, 1999
- [6] EHRENSTEIN, Gottfried W. *Polymerní kompozitní materiály*. V ČR 1. vyd. Praha: Scientia, 2009, 351 s. ISBN 978-80-86960-29-6.
- [7] HARPER, Charles A. *Handbook of plastics, elastomers, and composites*. 4th ed. New York: McGraw-Hill, c2002, xii, 884 p. ISBN 00-713-8476-6.
- [8] DAĐOUREK, K. *Kompozitní materiály - druhy a jejich použití*. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2007, 114 s.
- [9] CHUNG, Deborah D. L. *Composite Materials: Science and Applications*. 2nd ed. edition (29 Mar 2010). New York: Springer; 2010, xii, 884 p. ISBN 978-1-84882-830-8.
- [10] *Guide to Composites* [online]. [cit. 2012-11-14]. Dostupné z: <http://www.gurit.com/files/documents/guide-to-compositesv4pdf.pdf>
- [11] *Carbon Fiber Characteristics* [online]. [cit. 2013-01-22]. Dostupné z: <http://www.christinedemerchant.com/carboncharacteristics.html>
- [12] CHUNG, Deborah D. *Composite materials: functional materials for modern technologies*. London: Springer, 2003, 289 s. ISBN 18-523-3665-X.
- [13] EHRENSTEIN, Gottfried W. *Thermal analysis of plastics: theory and practice*. Munich: Hanser Gardner Publications, 2004, 368 s. ISBN 15-699-0362-X.
- [14] CHUNG, Deborah D. *Carbon fiber composites: functional materials for modern technologies*. Boston: Butterworth-Heinemann, c1994, x, 215 p. ISBN 07-506-9169-7.
- [15] JANČÁŘ, J. *Úvod do materiálového inženýrství polymerních kompozitů*. 1. vyd. Brno: VUT, 2003, 194 s. ISBN 80-214-2443-5.
- [16] GRIMVALL, Göran. *Thermophysical properties of materials*. Enl. and rev. ed. New York: Elsevier, 1999, xx, 424 p. ISBN 04-448-2794-3.

- [17] REINHART, Theodor J. *Composites* : Ohio: Metals Park, 1987, 983 s. ISBN 08-717-0279-7
- [18] Rolandberger. *Consultancy / Roland Berger* [online]. [cit. 2013-03-29]. Dostupné z: <http://www.rolandberger.com/>
- [19] CHAWLA, Krishan K., Ginger L GARDINER a Greg M MELLEMA. *Composite materials: science and engineering*. New York: Springer-Verlag, 1987, xii, 291 p. ISBN 35-409-6478-9.
- [20] Havel-composites.com. *Havel composites* [online]. [cit. 2013-03-29]. Dostupné z: <http://www.havel-composites.com/clanky/4-Technologie/76-Technologie-jejich-popis-a-schemata.html>
- [21] Fibreglast.com. *Fibreglast* [online]. [cit. 2013-04-01]. Dostupné z: <http://www.fibreglast.com/product/about-prepregs>
- [22] DORWORTH, Louis C, Ginger L GARDINER a Greg M MELLEMA. *Essentials of advanced composite fabrication and repair*. Newcastle, Wash.: Aviation Supplies, c2012, xii, 291 p. ISBN 15-602-7752-1
- [23] Mmspektrum: Výroba pohledových dílů z polymerů vyztužených uhlíkovými vlákny. [online]. [cit.2013-03-15]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/vyroba-pohledovych-dilu-z-polymeru-vyztuzenyh-uhlikovymi-vlakny.html>
- [24] *Prepreg Technology* [online]. [cit. 2012-12-28]. Dostupné z: http://www.hexcel.com/Resources/DataSheets/Brochure-Data-Sheets/Prepreg_Technology.pdf
- [25] NOŽIČKA, J. *Sdílení tepla*. Skripta. ČVUT v Praze, Fakulta strojní, 1997. 238 s. ISBN 80-01-00599-8.
- [26] TAVMAN, I. J. – Akinei,H.: Transverse thermal conductivity of fiber reinforced polymer composites. *Int. Comm. Heat Mass Transfer*, 2000.
- [27] *Application of Metal Matrix Composite Electronics Packaging Materials* [online]. [cit. 2013-01-18]. Dostupné z: http://www.academia.edu/861581/Application_of_Metal_Matrix_Composite_of_Cu_SiC_and_AlSiC_as_Electronics_Packaging_Materials
- [28] VILČÁKOVÁ J. *Elektrické a magnetické vlastnosti polymerních kompozitů*. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, Technologická fakulta UTB ve Zlíně, téma habilitační práce, 2007, 40 s. ISBN 978-80-7318-519-0
- [29] ZELOVÁ, J. *Elektrická a tepelná vodivost uhlíkových polymerních kompozitů*. [online]. Zlín, 2012 [cit. 2012-01-19]. 68 s. Dostupné z: http://portal.utb.cz/wps/PA_StagPortletsJSR168/KvalifPraceDownloadServlet?typ=1&adipidno=27271.

- [30] KU, C.C., LIEPIENS, R., *Elektrical properties of polymers*, Hanser, London, 1987
- [31] BLYTHE, Tony a David BLOOR. *Electrical properties of polymers*. 2nd ed. Cambridge: Cambridge University Press, c2005, 480 s. ISBN 05-215-5219-2.
- [32] Autodesk® WikiHelp. *Aplikace materiálů* [online]. [cit. 2013-03-30]. Dostupné z: <http://wikihelp.autodesk.com/Inventor/csy/2012/>
- [33] Notebookcheck: *Notebook / Laptop Reviews and News* [online]. [cit. 2013-01-19]. Dostupné z: <http://www.notebookcheck.net/Reviews.55.0.html>
- [34] Hardwarezone.com. *Hardware zone* [online]. [cit. 2013-03-30]. Dostupné z: <http://www.hardwarezone.com.sg/review-dell-xps-13-fast-compact-and-portable/does-carbon-fiber-actually-do-anything>
- [35] KOŠTIAL, P. Zařízení na bezkontaktní a automatické měření tepelných vlastností tuhých látek (užitný vzor) [online]. [cit. 2013-04-15].

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

AF	Aramid fiber	-
CF	Carbon fiber	-
EP-R	Epoxy resin	-
CFRP	Carbon-fiber-reinforced polymer	-
PMC	Kompozit s polymerní matricí	-
MMC	Kompozit s kovovou matricí	-
CMC	Kompozit s keramickou matricí	-
EP-R	Epoxy resin	-
PC	Polykarbonát	-
ABS	Akrylonitrilbutadienstyren	-
n	Počet měření	-
F	Síla	N
Q	Teplo	J
t	čas	s
ΔT	Teplotní rozdíl	$^{\circ}\text{C}$
x	Délka tepelného toku	m
c_p	Tepelná kapacita vzorku	J/kg.C
α	Teplotní vodivost vzorku	m^2/s
k	Tepelná vodivost materiálu	$\text{W}/\text{m}^{\circ}\text{.C}$
k_c	Tepelná vodivost kompozitu	$\text{W}/\text{m}^{\circ}\text{.C}$
1/k	Tepelný odpor	$\text{m}^{\circ}\text{.C}/\text{W}$
Q	Elektrický náboj	C
R	Odpor	Ω
T	Teplota	$^{\circ}\text{C}$

σ	Specifická elektrická vodivost	S/cm
I_E	Intenzita elektrického pole	V/cm
σ_c	Elektrická vodivost kompozitu	S/cm
σ_f	Elektrická vodivost plniva	S/cm
φ_f	Objemový podíl plniva	%
φ_{krit}	Objemový podíl plniva na perkolačním prahu	%
σ_m	Elektrická vodivost matrice	S/cm
t	kritický exponent pod oblastí perkolačního prahu	-
s	kritický exponent pro oblast perkolace	-
q	kritický exponent pod oblastí perkolačního prahu	-
ρ	hustota	g/cm ³
L	Indukčnosti	H
C	Kapacita	F
$\text{tg } \delta$	Ztrátový činitel	-
U	Napětí	V
I	Proud	A
f	Frekvence	Hz
ISO	Mezinárodní norma	-
E	Modul pružnost v ohybu	MPa
W_O	Modul průřezu v ohybu	mm ³
σ	Napětí	MPa
σ_p	Pevnost v tahu	MPa
σ_{max}	Mez pevnosti v ohybu	MPa
σ_B	Napětí při porušení	MPa
ε	Deformace	%

$\varepsilon_{F_{\max}}$	Poměrná deformace na mezi pevnosti	%
ε_B	Deformace při porušení	%
$y_{F_{\max}}$	Průhyb při mezi pevnosti	mm
$W_{\sigma_{\max}}$	Práce potřebná na dosažení maximální síly	N.mm
\bar{x}	Aritmetický průměr	-
M	Medián	-
s	Směrodatná odchylka	-
R	Variační rozpětí	-
x_{\min}	Minimální hodnota	-
x_{\max}	Maximální hodnota	-

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 1 Rozdělení kompozitů podle geometrie a orientace plniva a struktur: a) jednosměrně orientovaný dlouhovláknový kompozit, b) kompozit s dvousměrnou výztuží (tkanina), c) částicový kompozit, d) vrstvený (sendvičový) kompozit, e) krátkovláknový kompozit s náhodně orientovanými vlákny. [2]</i>	13
<i>Obr. 2. Kompozit podle tvaru a uspořádání výztuže [1]</i>	14
<i>Obr. 3. Typy vláknových výztuží [6]</i>	15
<i>Obr. 4 Zjednodušené schéma procesu vytvrzení reaktoplastu. (a) Monomery a oligomery. (b) Proces růstu a větvení při zvyšování viskozity. (c) Gelový stav za nevratným bodem gelace. (d) Plně vytvrzený reaktoplast. [8]</i>	23
<i>Obr. 5. Schématické výztuže typu o MMC [9]</i>	25
<i>Obr. 6 Skládání prepregu do formy [23]</i>	28
<i>Obr. 7 Teplo proudící z horkého na studený konec materiálu o průřezu A, délce x [9]</i>	30
<i>Obr. 8 Paralelní způsob měření [9]</i>	31
<i>Obr. 9 Sériový způsob měření [9]</i>	32
<i>Obr. 10 Schéma přístroje dle Bocka, 1 - Motorový kompenzátor, 2 – Wattmetr, 3 - 12 Stupňový přepínač výkonu, 4 - Topení (70Ω), 5 – Termostaty, 6 - Topné desky, 7 - Zkušební deska, 8 - Odporové teploměry</i>	33
<i>Obr. 11 Schéma přístroje dle Fitcha, 1 - Temperační deska pro teplotu t_1, 2 - Temperační deska pro teplotu t_2, 3 - Měřicí váleček, 4 - Termočlánek, 5 - Systém ADAM, 6 - Osobní počítač, 7 - Izolační kryt měřícího válečku, 8 - Stabilizovaný stejnosměrný zdroj, 9 - Měřený vzorek, 10 – Termostaty</i>	34
<i>Obr. 12 Přenos náboje tunelování a přeskok [30]</i>	36
<i>Obr. 13 Závislost koncentrace plniva na vodivosti [31]</i>	37
<i>Obr. 14 Kryt z ABS plastu [33]</i>	39
<i>Obr. 15 Hliníkový kryt [33]</i>	41
<i>Obr. 16 Hořčíkový kryt [33]</i>	42
<i>Obr. 17 Kryt z uhlíkového vlákna [34]</i>	42
<i>Obr. 18 Prepregový polotovár - připraven k lisování</i>	47
<i>Obr. 19 Vyhřívání lis – FT UTB Zlín</i>	48
<i>Obr. 20 Výsledné desky po vylisování</i>	49
<i>Obr. 21 Mikroskopický přístroj s optikou Carl Zeiss Jena</i>	50
<i>Obr. 22 Mikroskopický pohled na řez vzorku $A - 1\text{ mm}$ (30x)</i>	50

<i>Obr. 23 Mikroskopický pohled na řez vzorku B – 1,4 mm (30x)</i>	<i>51</i>
<i>Obr. 24 Mikroskopický pohled na řez vzorku C – 2 mm (30x)</i>	<i>51</i>
<i>Obr. 25 Buňka pro měření zejména dlouhodobých časových závislostí elektrických a dielektrických vlastností plastických látek.</i>	<i>52</i>
<i>Obr. 26 Schéma měřicí buňky: 1 vzorek, 2 elektroda, 3 přitlačná pružina, 4 opěrná keramická destička, 5 kovové rameno, 6 nosná křemenná kapilára, 7 dveře měřicí buňky, 8 spínací teploměr Vertex od 0 do 300 °C, 9 odporový ohřev, 10 aktivní část ventilátoru, 11 termočlánek typu K (Ni-NiCr), 12 pohon ventilátoru, 13 kovové těleso měřicí buňky, A elektrické přívody ventilátoru, B elektrické přívody topných těles z odporového drátu, C měřicí elektrické přívody, D elektrické přívody v termočláncu typu K (Ni-NiCr), E elektr. přívody ovládní teploměru Vertex.</i>	<i>53</i>
<i>Obr. 27 Uchycení vzorků a elektrod</i>	<i>54</i>
<i>Obr. 28 Elektrické schéma zařízení pro měření elektrických a dielektrických vlastností: 1 vzorek, 2 elektrody, 3 termočlánek typu K (Ni-NiCr), 4 milivoltmetr (DMM Appa 305), 5 měřicí buňka, 6 vinutí ohřevu, 7 ventilátor, 8 ampérmetr, 9 LCR metr (Goodwill LCR 819, Hioki 3522-50), 10 ohmmetr (DMM Appa 305), 11 počítač, 12 spínací teploměr Vertex, 13 ovládní ohřevu, 14 autotransformátor.</i>	<i>55</i>
<i>Obr. 29 Pohled na obrazovku s programovým vybavením určeným pro řízení a záznam experimentu.</i>	<i>57</i>
<i>Obr. 30 Pohled na obrazovku s určením měřicích frekvencí při použití přístroje Goodwillu LCR 819 umožňujícího volit až 503 frekvencí z rozsahu 12 Hz až 100 kHz.</i>	<i>57</i>
<i>Obr. 31 Pohled na obrazovku s určením teplotního cyklu, použitého při experimentu.</i>	<i>58</i>
<i>Obr. 32 Pohled na obrazovku s programovým vybavením určeným pro řízení a záznam experimentu určený pro měření frekvenčních závislostí při konstantní teplotě.</i>	<i>58</i>
<i>Obr. 33 Frekvenční závislost střídavé konduktivity vzorků 3. série A-1 mm, B-1,4 mm, C-2 mm stanovené při teplotě 100°C.....</i>	<i>59</i>
<i>Obr. 34 Frekvenční závislost ztrátového činitele vzorků 3. série A-1 mm, B-1,4 mm, C-2 mm stanovené při teplotě 100°C</i>	<i>60</i>

<i>Obr. 35 Detail frekvenční závislosti střídavé konduktivity vzorku 3 série B-1.4 mm stanovená při teplotě 100°C</i>	<i>61</i>
<i>Obr. 36 Teplotní závislost střídavé konduktivity pro vzorek 3. série A-1 mm, při měřících frekvencích 100 kHz, 15 KHz, 2,5 kHz, 600 Hz, 91 Hz, 15 Hz</i>	<i>61</i>
<i>Obr. 37 Teplotní závislost střídavé konduktivity pro vzorek 3. série B-1,4 mm, při měřících frekvencích 100 kHz, 15 KHz, 2,5 kHz, 600 Hz, 91 Hz, 15 Hz</i>	<i>62</i>
<i>Obr. 38 Teplotní závislost střídavé konduktivity pro vzorek 3. série C-2 mm, při měřících frekvencích 100 kHz, 15 KHz, 2,5 kHz, 600 Hz, 91 Hz, 15 Hz</i>	<i>63</i>
<i>Obr. 39 Schéma přístroje: 1- PC, 2 Elektronika, 3 - Pyrosenzor s citlivosti 0,1 °C, 4 - Adiabatická komora, 5 - Tepelná izolace, 6 - Podložky na uložení vzorku, 7 - Vzorek.....</i>	<i>65</i>
<i>Obr. 40 Adiabatická komora pro uložení vzorku s izolovanou stěnou</i>	<i>66</i>
<i>Obr. 41 Příklad teplotní křivky ochlazení vzorku</i>	<i>66</i>
<i>Obr. 42 Zkušební stroj Zwick Roell 1456 s teplotní komorou při 60 °C</i>	<i>68</i>
<i>Obr. 43 Průběhy ohybové zkoušky vzorku při teplotě 22 °C o tloušťce 1 mm závislost síly na deformaci</i>	<i>72</i>
<i>Obr. 44 Průběh napětí na poměrné deformaci pro vzorek o tloušťce 1 mm</i>	<i>72</i>
<i>Obr. 45 Průběhy ohybové zkoušky vzorku při teplotě 22 °C o tloušťce 1,4 mm závislost síly na deformaci</i>	<i>73</i>
<i>Obr. 46 Průběh napětí na poměrné deformaci pro vzorek o tloušťce 1,4 mm</i>	<i>73</i>
<i>Obr. 47 Průběhy ohybové zkoušky vzorku při teplotě 22 °C o tloušťce 2 mm závislost síly na deformaci</i>	<i>74</i>
<i>Obr. 48 Průběh napětí na poměrné deformaci pro vzorek o tloušťce 2 mm</i>	<i>74</i>
<i>Obr. 49 Průběhy ohybové zkoušky vzorku při teplotě 60 °C o tloušťce 1 mm závislost síly na deformaci</i>	<i>77</i>
<i>Obr. 50 Průběh napětí na poměrné deformaci pro vzorek o tloušťce 1 mm</i>	<i>77</i>
<i>Obr. 51 Průběhy ohybové zkoušky vzorku při teplotě 60 °C o tloušťce 1,4 mm závislost síly na deformaci</i>	<i>78</i>
<i>Obr. 52 Průběh napětí na poměrné deformaci pro vzorek o tloušťce 1,4 mm</i>	<i>78</i>
<i>Obr. 53 Průběhy ohybové zkoušky vzorku při teplotě 60 °C o tloušťce 2 mm závislost síly na deformaci</i>	<i>79</i>
<i>Obr. 54 Průběh napětí na poměrné deformaci pro vzorek o tloušťce 2 mm</i>	<i>79</i>
<i>Obr. 55 Porovnání modulu pevnosti v ohybu při 22 °C a 60 °C</i>	<i>80</i>

<i>Obr. 56 Porovnání deformace porušení při 22 °C a 60 °C</i>	80
<i>Obr. 57 Náklady na výrobu dílu</i>	82
<i>Obr. 58 Porovnání nákladů na výrobu dílu</i>	84

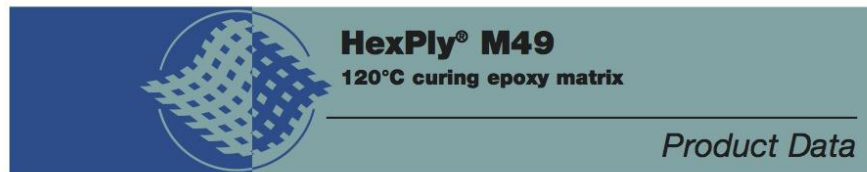
SEZNAM TABULEK

<i>Tab. 1: Pevnostní poměry jednotlivých materiálů</i>	18
<i>Tab. 2 Typy kompozitních materiálů</i>	20
<i>Tab. 3: Mechanické vlastnosti MMC</i>	26
<i>Tab. 4 Mechanické vlastnosti uhlíkové matrice</i>	27
<i>Tab. 5 Mechanické vlastnosti CMC</i>	27
<i>Tab. 6 Základní rozdělení elektricky vodivých látek</i>	35
<i>Tab. 7 Přehled vlastností inženýrských plastů</i>	40
<i>Tab. 8 Přehled vlastností hliníku</i>	41
<i>Tab. 9 Vlastnosti matrice [PI]</i>	46
<i>Tab. 10 Vlastnosti prepregu [PI]</i>	46
<i>Tab. 11 Tloušťky jednotlivých vzorků</i>	47
<i>Tab. 12 Parametry při lisování</i>	47
<i>Tab. 13 Technické údaje lisu</i>	48
<i>Tab. 14 Vybrané vlastnosti přístroje Goodwill LCR 819.</i>	55
<i>Tab. 15 Vybrané vlastnosti přístroje Hioki 3522-50.</i>	56
<i>Tab. 16 Vybrané vlastnosti přístroje DMM Appa 305.</i>	56
<i>Tab. 17 Vyhodnocení tepelné vodivosti bezkontaktní metoda</i>	67
<i>Tab. 18 Porovnání naměřených hodnoty s tabulkovými tepelných vlastností</i>	67
<i>Tab. 19 Technické specifikace přístroje Zwick Roell 1456</i>	68
<i>Tab. 20 Naměřené hodnoty ohybové zkoušky za okolní teploty 22°C</i>	70
<i>Tab. 21 Vyhodnocení hodnot zkoušky ohybem pro vzorek tloušťky 1 mm při 22°C</i>	71
<i>Tab. 22 Vyhodnocení hodnot zkoušky ohybem pro vzorek tloušťky 1,4 mm při 22°C</i>	71
<i>Tab. 23 Vyhodnocení hodnot zkoušky ohybem pro vzorek tloušťky 2 mm při 22°C</i>	71
<i>Tab. 24 Naměřené hodnoty ohybové zkoušky za zvýšené teploty 60°C</i>	75
<i>Tab. 25 Vyhodnocení hodnot zkoušky ohybem pro vzorek tloušťky 1 mm při 60°C</i>	76
<i>Tab. 26 Vyhodnocení hodnot zkoušky ohybem pro vzorek tloušťky 1,4 mm při 60°C</i>	76
<i>Tab. 27 Vyhodnocení hodnot zkoušky ohybem pro vzorek tloušťky 2 mm při 60°C</i>	76
<i>Tab. 28 Pokles hodnot naměřených při zvýšené teplotě</i>	81
<i>Tab. 29 Kalkulace spotřeby materiálu</i>	83
<i>Tab. 30 Kalkulace výrobních nákladů</i>	83

SEZNAM PŘÍLOH

PI Materiálový list prepreg HexPly® M49

PŘÍLOHA P I: MATERIÁLOVÝ LIST PREPREG HEXPLY® M49



Description

HexPly® M49 is a 120°C curing toughened epoxy matrix with good impact resistance suitable for use in performance cars. The matrix is highly tolerant to a wide variety of production techniques and equipment making it easy to process. Hexply® M49 is especially suitable for cosmetic applications (eg car interiors)

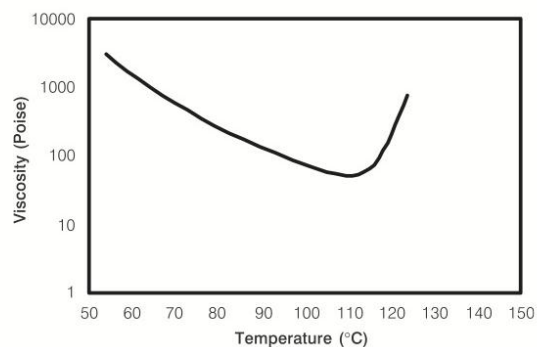
Benefits and Features

- High Toughened epoxy
- Good impact resistance
- Self adhesive on Honeycomb
- Good stability under UV
- Autoclave or vacuum bag processing
- Long shelf life and out life at room temperature
- Excellent tack and drap

Resin Matrix Properties

Colour	Transparent
Density (g/cm ³)	1,18
Curing Enthalpy (J/g)	290
Gel time at 120°C (min)	12 - 14
Minimum Viscosity (poise)	50
Tg after 120°C 60 min cure dry (°C)	115
Tg wet (°C)	90

Viscosity profile (heat up rate 2°C/min)





HexPly® M49

Prepreg Types

Fibre Designation	200P	245T2	285P	370T2	370S5	600T2
Type	3K high strength carbon	3K high strength carbon	6K high strength carbon	12K high strength carbon	6K high strength carbon	12K high strength carbon
Style	Plain weave	Twill 2X2	Plain weave	Twill 2X2	Satin weave,5 H	Twill 2X2
Weight (g/m ²)	200	245	285	370	370	600
Nominal cure ply thickness (mm)	0.234	0.287	0.333	0.433	0.433	0.660
M49 resin content by weight (%)	42	42	42	42	42	39

Cured Prepreg Mechanical Properties (cured at 120°C in autoclave)

Properties	Test Method	200P	245T2	285P	370T2	370S5	600T2
0° tensile Strength (Mpa) Modulus (Gpa)	prEN2561	900 64	980 69	940 64	1040 61	955 65	870 65
0° compression Strength (Mpa)	prEN 2850 B	725	650	650	600	550	510
0° Flexural Strength (Mpa) Modulus (Gpa)	prEN 2562	850 52	900 55	860 53	880 53	860 50	800 55
0° Interlaminar Shear Strength (Mpa)	prEN2563	63	59	60	58	59	63

Results for cured prepregs at 55% fibre volume content.

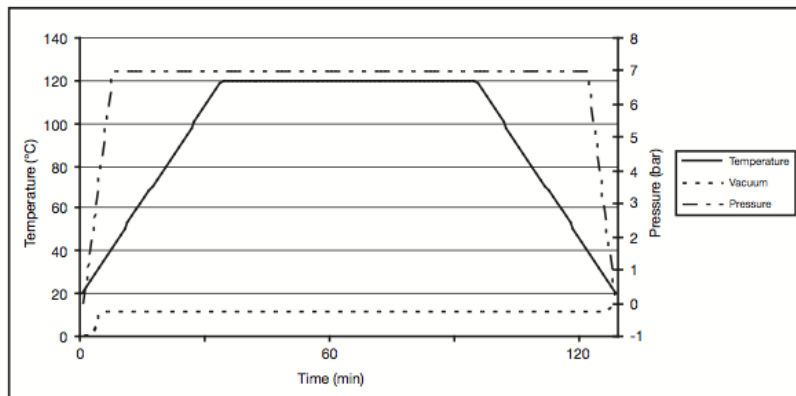
120°C curing epoxy matrix

Prepreg Curing Conditions

For cosmetic parts it is recommended to use autoclave process rather than vacuum only.

A typical autoclave cure cycle for a thin part is:

- (1) Apply the full vacuum (0.9 bar)
- (2) Apply 7 bar gauge autoclave pressure
- (3) Reduce vacuum to a safety value of 0.2 bar when the autoclave pressure reaches approximately 1 bar gauge
- (4) Heat up at 1-3 °C/minute to 120°C
- (5) Hold at 120°C for 60 minutes
- (6) Cool at 2-5°C/min
- (7) Vent autoclave pressure when the component reaches 60°C or below.



Heat-up rates are dependent on component thickness, eg, slow heat-up rates should be used for thicker components and large tools. Accurate temperature measurements of the component should be made during the cure cycles by using thermocouples. For a honeycomb sandwich panel, a cure pressure of 1 – 3 bars should be used, dependent on honeycomb density.

Alternative cure cycle can be used:

Cure temperature (°C)	Time (min)
140	30
120	60
100	120
90	360
85	720

Performance testing should be done for alternative cure cycle (to 60min at 120°C autoclave) in order to ensure suitability for the particular application. Cycles lower than 120°C cure will be suitable depending on the application, especially level of Tg needed.

A recommended vacuum cycle for a thin part is:

- (1) Apply the full vacuum (0.9 bar)
- (2) Heat up at 1-2 °C/minute to 120°C
- (3) Hold at 120°C for 60 minutes
- (4) Cool at 2-5°C/min

**Prepreg Storage Life**

- Out Life: 30 days at RT (23°C/73°F)
- Shelf Life: 12 months at -18°C (0°F) (from date of manufacture)

Definitions:

- Shelf Life: The maximum storage life for HexPly® Prepreg, when stored continuously, in a closed moisture proof bag, at -18°C (0°F). To accurately establish the exact expiry date, consult the box label.
- Out Life: The maximum accumulated time allowed at room temperature between removal from the freezer and cure.

Storage Conditions

HexPly® M49 prepregs should be stored as received in a cool dry place or in a refrigerator. After removal from refrigerator storage, prepreg should be allowed to reach room temperature before opening the polythene bag, thus preventing condensation. (A full reel in its packaging can take up to 48 hours).

Precautions for Use

The usual precautions when handling uncured synthetic resins and fine fibrous materials should be observed, and a Safety Data Sheet is available for this product. The use of clean disposable inert gloves provides protection for the operator and avoids contamination of material and components. 120°C curing epoxy matrix

Important

All information is believed to be accurate but is given without acceptance of liability. Users should make their own assessment of the suitability of any product for the purposes required. All sales are made subject to our standard terms of sale which include limitations on liability and other important terms.

©Copyright Hexcel Corporation
Publication FTM175c (Nov 2008)

For More Information

Hexcel is a leading worldwide supplier of composite materials to aerospace and other demanding industries. Our comprehensive product range includes:

- Carbon Fibre
- RTM Materials
- Honeycomb Cores
- Carbon, glass, aramid and hybrid prepregs
- HexTOOL® composite tooling material
- Structural Film Adhesives
- Honeycomb Sandwich Panels
- Engineered Core
- Reinforcement Fabrics

For US quotes, orders and product information call toll-free 1-800-688-7734

For other worldwide sales office telephone numbers and a full address list please go to:

<http://www.hexcel.com/contact/salesoffices>