

Výzkum termomechanického zatížení uhlíkových kompozitů

Bc. Petr Tichý

Diplomová práce
2017

 Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická
Ústav výrobního inženýrství
akademický rok: 2016/2017

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Petr Tichý**
Osobní číslo: **T14323**
Studijní program: **N3909 Procesní inženýrství**
Studijní obor: **Výrobní inženýrství**
Forma studia: **kombinovaná**

Téma práce: **Výzkum termomechanického zatížení uhlíkových kompozitů**

Zásady pro vypracování:

- 1. Literární rešerše**
- 2. Uhlík a uhlíkové kompozitní materiály**
- 3. Mechanické vlastnosti polymerních kompozitních materiálů a jejich hodnocení**
- 4. Vliv teploty na mechanické vlastnosti polymerních kompozitních materiálu, příklady řešení**
- 5. Experimentální část**
- 6. Volba materiálového složení kompozitního systému s různými typy uhlíkových vláken**
- 7. Experimentální testování termomechanického zatížení dle stanovených norem**
- 8. Zhodnocení dosažených výsledku**
- 9. Formulace závěru**

Rozsah diplomové práce:

Rozsah příloh:

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

Seznam odborné literatury:

Dle doporučení vedoucího práce

Vedoucí diplomové práce:

doc. Ing. Soňa Rusnáková, Ph.D.

Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání diplomové práce:

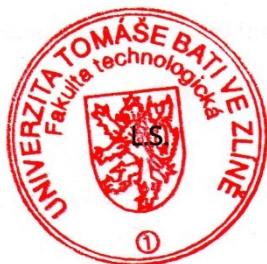
2. ledna 2017

Termín odevzdání diplomové práce:

12. května 2017

Ve Zlíně dne 23. ledna 2017

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



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

Příjmení a jméno: TICHÝ PĚTR

Obor: VÝROBNÍ INŽENÝRS

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 obhajoby¹⁾;
- 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. 3²⁾;
- beru na vědomí, že podle § 60³⁾ 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 § 60³⁾ odst. 2 a 3 mohu užít své dílo – diplomovou/bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- beru na vědomí, že pokud bylo k vypracování diplomové/bakalářské práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tedy pouze k nekomerčnímu využití), nelze výsledky diplomové/bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- beru na vědomí, že pokud je výstupem diplomové/bakalářské práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Ve Zlíně 30.4.2017

.....


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

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

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

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

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

(3) Do práva autorského také nezasahuje škola nebo školské či vzdělávací zařízení, užíje-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 jím dosaženého v souvislosti s užitím díla či poskytnutím licence podle odstavce 2 přiměřeně přispěl na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložily, a to podle okolností až do jejich skutečné výše; přitom se přihlédne k výši výdělku dosaženého školou nebo školským či vzdělávacím zařízením z užití školního díla podle odstavce 1.

ABSTRAKT

Diplomová práce je zaměřena na výzkum termomechanického namáhání uhlíkových kompozitních systémů. V teoretické části je popsán postup získávání a výroby uhlíku a uhlíkových kompozitů, popis mechanických vlastností a srovnání s ostatními kompozitními systémy. Dále je v teoretické části zmíněn vliv teploty na mechanické vlastnosti kompozitních materiálů.

Praktická část se zaměřuje na vliv teploty při mechanickém namáhání uhlíkových kompozitních systémů s podobnou strukturou. Výsledky byly vyhodnoceny a srovnány v grafickém znázornění.

Klíčová slova: Uhlík, kompozit, výztuž, matrice, mechanické vlastnosti, tah, ohyb

ABSTRACT

The thesis is focused on research thermomechanical loading carbon composite systems. In the theoretical part describes the procedure for obtaining and producing carbon, and carbon composites, and a description of the mechanical properties compared to other composite systems. Further, in the theoretical part is mention of influence of temperature on mechanical properties of composite materials.

The practical part is focused on the effect of temperature on mechanical loading carbon composite systems of similar structure. The results were evaluated and compared in a graphical representation.

Keywords: Carbon, Composite, Reinforcement, Matrix, Mechanical Properties, Tensile, Bending

Chtěl bych poděkovat vedoucí mé diplomové práce doc. Ing. Soně Rusnákové, Ph.D. za odborné vedení, rady, připomínky a čas, který mi věnovala pro zpracování diplomové práce. Dále bych rád poděkoval panu Ing. Milanu Žaludkovi za pomoc a ochotu při testování zkušebních vzorků v laboratořích Univerzity Tomáše Bati, také bych chtěl poděkovat Ing. Lukáši Maňasovi za příležitostné informace a konzultace. V neposlední řadě bych chtěl poděkovat rodičům za podporu při studiu.

„Najít správný směr, mezi opatrností a odvahou je to největší umění.“

(Tomáš Baťa)

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

OBSAH

ÚVOD.....	11
I TEORETICKÁ ČÁST.....	12
1 UHLÍK A UHLÍKOVÉ KOMPOZITNÍ MATERIÁLY	13
1.1 PRVEK UHLÍK A JEHO FORMY	13
1.1.1 Diamant	14
1.1.2 Grafit	15
1.2 VLASTNOSTI FOREM UHLÍKU	16
1.3 ZÍSKÁVÁNÍ UHLÍKOVÝCH MATERIÁLŮ	17
1.3.1 Pyrolýza, karbonizace, koksování	18
1.3.2 Grafitace	18
1.4 UHLÍKOVÁ VLÁKNA	19
1.4.1 Uhlíková vlákna nižších parametrů	19
1.4.2 Uhlíková vlákna s vysokými mechanickými parametry	19
1.5 VÝROBA UHLÍKOVÝCH VLÁKEN	20
1.5.1 Výroba vláken na bázi PAN	20
1.5.2 Výroba na bázi smol a mezofáze	20
1.5.3 Použití uhlíkových vláken	21
1.5.4 Rozmístění uhlíkových vláken v matrici	23
2 MECHANICKÉ VLASTNOSTI POLYMERNÍCH KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ A JEJICH HODNOCENÍ.....	25
2.1 MECHANICKÉ VLASTNOSTI VLÁKEN	25
2.2 TECHNOLOGIE VÝROBY VYBRANÝCH VLÁKEN	26
2.2.1 Skelná vlákna	26
2.2.2 Uhlíková vlákna	27
2.2.3 Aramidová vlákna	28
2.3 SROVNÁNÍ SKELNÝCH, UHLÍKOVÝCH A ARAMIDOVÝCH VLÁKEN	28
3 VLIV TEPLoty NA MECHANICKÉ VLASTNOSTI POLYMERNÍCH KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ, PŘÍKLADY ŘEŠENÍ.....	30
3.1 TEPLOTNÍ HRANICE POUŽITÍ VYZTUŽENÝCH PLASTŮ	31
3.2 TEPLOTNÍ ROZTAŽNOST JEDNOSMĚRNĚ VYZTUŽENÉ VRSTVY	32
3.3 TEPLOTNÍ ROZTAŽNOST ROVNOVÁŽNÉ DVOJVRSTVY	34
3.4 TEPLOTNÍ ROZTAŽNOST KŘÍŽNĚ VYZTUŽENÉHO KOMPOZITU.....	36
3.5 TEPLOTNÍ ROZTAŽNOST VRSTVY VYZTUŽENÉ ROHOŽÍ.....	37
II PRAKTICKÁ ČÁST	39
4 CÍLE PRAKTICKÉ ČÁSTI.....	40
5 MATERIÁLOVÉ SLOŽENÍ KOMPOZITNÍCH SYSTÉMŮ	41

5.1	VÝZTUŽ.....	41
5.2	MATRICE.....	42
5.2.1	Epoxidová pryskyřice L-285.....	42
5.2.2	Tužidlo 285.....	42
5.2.3	Epoxidová pryskyřice LH-210.....	43
5.2.4	Tužidlo H-10.....	43
6	VÝROBA KOMPOZITNÍCH SYSTÉMŮ.....	44
6.1	VÝROBA SYSTÉMŮ RUČNÍM LAMINOVÁNÍM.....	44
6.2	VÝROBA ZKUŠEBNÍCH TĚLES DLE TECHNICKÝCH NOREM PRO DANÉ ZKOUŠKY.....	47
6.3	TEPLOTNÍ VYTVRZENÍ ZKUŠEBNÍCH VZORKŮ PO DOBU 14TI DNŮ.....	48
7	POUŽITÁ TESTOVACÍ ZAŘÍZENÍ.....	49
7.1	UNIVERZÁLNÍ ZKUŠEBNÍ ZAŘÍZENÍ ZWICK 1456.....	49
7.2	TROUBA FAGOR 6H.....	50
8	ZKOUŠKA PRO STANOVENÍ TAHOVÝCH VLASTNOSTÍ.....	52
8.1	NAMĚŘENÉ HODNOTY PRO VZORKY S MATRICÍ L-285.....	53
8.1.1	Vzorky při pokojové teplotě 22,5°C.....	53
8.1.2	Vzorky při pokojové teplotě 22,5 °C s předchozím vytvrzením 60 °C.....	55
8.2	NAMĚŘENÉ HODNOTY PRO VZORKY S MATRICÍ LH-210.....	56
8.2.1	Vzorky při pokojové teplotě 22,5°C.....	57
8.2.2	Vzorky při pokojové teplotě 22,5°C s předchozím vytvrzením 60°C.....	58
9	ZKOUŠKA PRO STANOVENÍ OHYBOVÝCH VLASTNOSTÍ.....	60
9.1	NAMĚŘENÉ HODNOTY PRO VZORKY S MATRICÍ L-285.....	61
9.1.1	Vzorky při pokojové teplotě 22,5 °C.....	61
9.1.2	Vzorky při pokojové teplotě 22,5 °C s předchozím vytvrzením 60 °C.....	62
9.1.3	Vzorky při teplotě 80 °C.....	64
9.1.4	Vzorky s předchozím vytvrzením 60 °C při teplotě 80 °C.....	65
9.2	NAMĚŘENÉ HODNOTY PRO VZORKY S MATRICÍ LH-210.....	66
9.2.1	Vzorky při pokojové teplotě 22,5 °C.....	67
9.2.2	Vzorky při pokojové teplotě 22,5 °C s předchozím vytvrzením 60 °C.....	68
9.2.3	Vzorky při teplotě 80 °C.....	70
9.2.4	Vzorky s předchozím vytvrzením 60 °C při teplotě 80 °C.....	71
10	VYHODNOCENÍ EXPERIMENTÁLNÍCH VÝSLEDKŮ.....	73
10.1	POROVNÁNÍ TAHOVÝCH VLASTNOSTÍ.....	73
10.1.1	Modul pružnosti v tahu.....	73
10.1.2	Mez pevnosti v tahu.....	74
10.1.3	Práce potřebná k přetržení v tahu.....	75
10.2	POROVNÁNÍ OHYBOVÝCH VLASTNOSTÍ.....	76
10.2.1	Modul pružnosti v ohybu.....	76
10.2.2	Mez pevnosti v ohybu.....	78
10.2.3	Potřebná práce při maximálním zatížení.....	80
	ZÁVĚR.....	82
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	84

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	86
SEZNAM OBRÁZKŮ	87
SEZNAM TABULEK.....	89
SEZNAM PŘÍLOH.....	91

ÚVOD

Diplomová práce je zaměřena na výzkum vlivu teploty na mechanické namáhání uhlíkových kompozitních systémů. Teoretická část je zaměřená na informace ohledně samotného prvku uhlíku a jeho formy. Dále na nejznámější formy získávání uhlíku a jejich vlastnosti. V této části práce jsou kapitoly zabývající se uhlíkovými vlákny s nízkou a vysokou pevností. V další kapitole je rozebrána výroba uhlíkových vláken na bázi PAN, mezofáze a jejich použití. Dále je zde část zabývající se mechanickými vlastnostmi vláken a to i pro srovnání vláken jiného než uhlíkového původu. V závěru teoretické části je pak kapitola zabývající se teplotní hranicí použití vyztužených plastů a teplotní roztažností vyztužených vrstev kompozitu.

Praktická část se zabývá materiálovým složením kompozitních systémů, na kterých budou prováděny testy. Jsou zde tedy popsány jednotlivé použité materiály pro tvorbu kompozitních systémů a jejich výroba pomocí ruční laminace. Dále jsou zde uvedena testovací zařízení, na kterých byly testy prováděny. V této části práce jsou popsány jednotlivé zkoušky, kterými byly testovací vzorky vystaveny. Na základě experimentálního testování, za určitých podmínek, byly vyhodnoceny výsledky, ze kterých mohlo dojít k porovnání vlastností námi vyrobených kompozitních systémů. Na závěr došlo k diskuzi a vyhodnocení, lze-li použít naše vyrobené systémy k aplikaci za zvýšených teplot.

I. TEORETICKÁ ČÁST

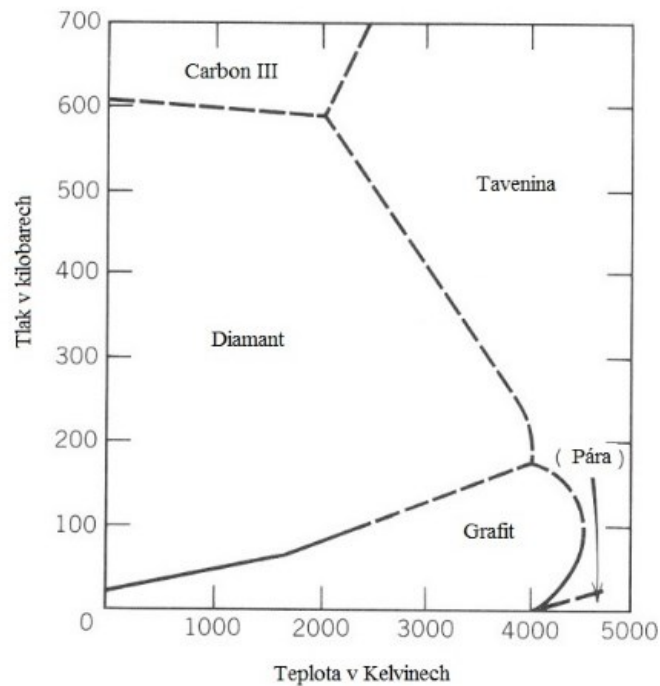
1 UHLÍK A UHLÍKOVÉ KOMPOZITNÍ MATERIÁLY

Uhlík jako materiál odolává teplotám vysokým i nad 2000 °C bez zhoršení svých mechanických vlastností. Do teplot nad 2500 °C dochází v případě uhlíku dokonce ke zlepšování mechanických vlastností. Uhlík může být vodičem stejně jako kovy nebo izolátorem stejně jako keramika. Může mít mazací vlastnosti nebo být mechanicky velmi odolný. Slouží pro výrobu kompozitních materiálů a bývá využíván i ve formě tkanin. Jeho vlastnosti lze modifikovat a díky tomu přizpůsobovat materiál požadavkům pro použití v daném oboru. Uhlíkové materiály se staly velmi moderními, používanými jak v tradičním průmyslu, tak i ve špičkových odvětvích, jako je kosmonautika a jejich význam stále roste [1].

1.1 Prvek uhlík a jeho formy

Uhlík je základem všech organických sloučenin. Ačkoliv je tento chemický prvek na zemi zastoupen v relativně malém množství, je v jistých ohledech mnohem významnější než ostatní prvky, a to díky schopnosti tvořit velké množství molekul. V současnosti je popsáno více než 20 milionů organických sloučenin. Uhlík se v přírodě vyskytuje ve formě sloučenin obsažených v horninách, ve vzduchu nebo jako grafit a diamant v ryzím stavu. Sloučeniny uhlíku tvoří také základ světové energetiky jako zemní plyn, ropa nebo uhlí. S výrobky z chemického průmyslu na bázi uhlíku se setkáváme ve formě plastů, umělých vláken nebo např. léčiv.

Uhlí patří mezi nekovové prvky a v přírodě se v elementárním stavu jako minerál vyskytuje ve dvou základních modifikacích - grafit a diamant. V posledních letech byly v přírodě objeveny nebo laboratorně vytvořeny další modifikace jako například chaoit, grafyn a fullereny [1].



Obr. 1 – fázový diagram uhlíku [2]

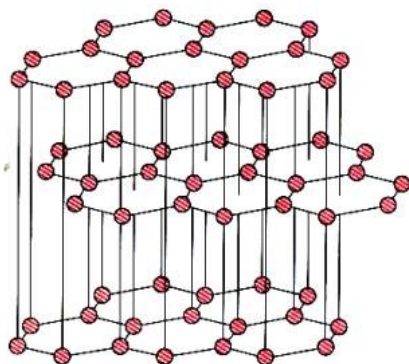
1.1.1 Diamant

Diamant je čistý přírodní uhlík vykrystalizovaný v horninách ve velkých hloubkách za přítomnosti velmi vysokého tlaku. V diamantu je každý jednotlivý atom uhlíku vázán s ostatními atomy silnou kovalentní vazbou. Nejběžnější struktura diamantu je kubická s opakováním vrstev ABCABC a připadá u ní 8 atomů na základní buňku. Jen velmi zřídka se vyskytuje struktura hexagonální.

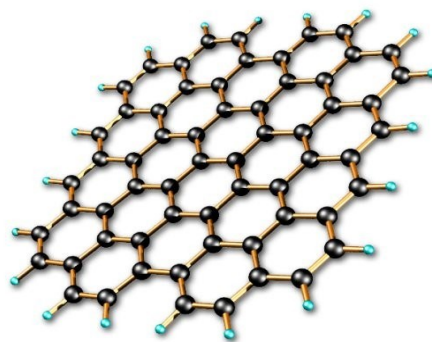
Diamant je nejtvrdším materiálem této planety. Dosahuje nejvyššího (10.) stupně tvrdosti na Mohsově stupnici. Jeho modul pružnosti je také nejvyšší ze všech známých materiálů (1050 GPa). Diamant má měrnou hmotnost $3,51\text{g/cm}^3$ a 6x větší tepelnou vodivost než měď. Této vlastnosti se využívá při použití diamantů v nanotechnologiích. Co se chemické stability týče, je diamant inertní materiál, který reaguje pouze v silně oxidačních prostředích za zvýšené teploty [1].

1.1.2 Grafit

Grafit je šesterečný, nekovový minerál, který je za běžných podmínek stabilní formou uhlíku. Atomy uhlíku jsou v ideálním případě uspořádány v paralelních rovinách a v této rovině atomy vytváří síť s hexagonálním motivem (obr. 2). Strana těchto šestiúhelníků měří 0,142 nm. Atomy jsou v této rovině pospojovány mezi sebou silnou kovalentní vazbou (obr. 3), zatímco atomy umístěné v paralelních rovinách, vzdálených 0,335 nm, jsou vázány mnohem slabší Van der Waalsovou silou. Díky tomu dochází ke snadné štěpnosti ve směru, který je k těmto rovinám rovnoběžný (jedna rovina vůči druhé se může snadno posunovat).



Obr. 3 - Hexagonální grafit a jeho mřížka [3]



Obr. 2 – Grafenová vrstva [4]

Ideální monokrystal grafitu má hustotu $2,269 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$. Hustota u syntetického grafitu málo kdy překročí hodnotu $2 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$. Obvykle mají hustotu dokonce $1,6 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$. Mechanické vlastnosti závisí na směru působení zatížení. Ve směru kolmém k rovinám grafenových vrstev jsou velmi nízké, naopak ve směru rovnoběžném jsou velmi vysoké. Tvrdost grafitu je na Mohsově stupnici 1,2. Uhlík je nejžáruvzdornější prvek. Zajímavostí je, že do teploty 2500°C dochází k nárůstu pevnostních charakteristik. Grafit je chemicky velice odolný a za běžných teplot je inertní. Za vyšších teplot tvoří karbidy [1], [5], [6].

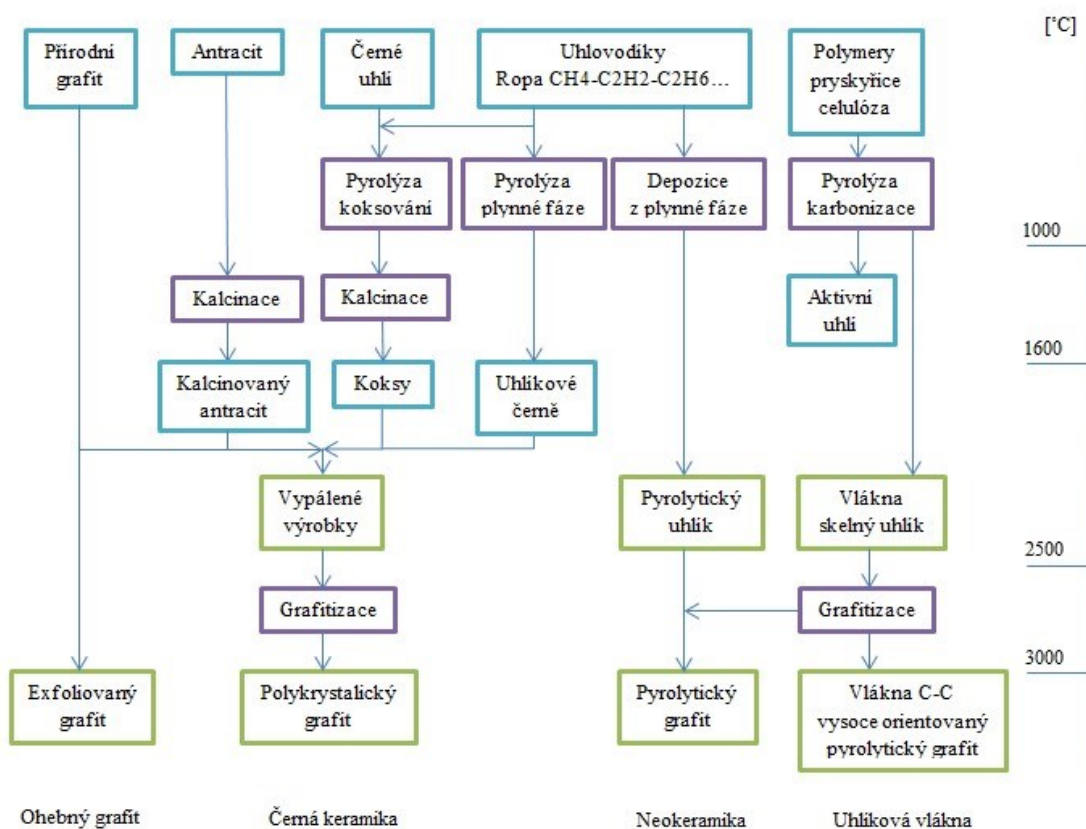
1.2 Vlastnosti forem uhlíku

Uvedené hodnoty jsou měřeny ve směru rovnoběžném s preferenční orientací grafenových vrstev s výjimkou tučných hodnot, kde jsou měřeny kolmo ke grafenovým vrstvám [5].

Vlastnost	Uhlíkový materiál							
	Pružný uhlík	Skelný uhlík	Vypálený grafit	Spřádený grafit	Izotropní uhlík	Uhlíková vlákna	Pyrolytický grafit	Vysoce orientovaný pyr. grafit
Specifická hmotnost [g·cm ⁻³]	1,1	1,5	1,6	1,7	1,75	1,8	2	2,26
Pevnost v tahu [MPa]	4	100	9	12	25	3000	190	
Modul pružnosti [GPa]		25	11	10	12	500	350	1000
Odpor [mΩ·cm ⁻¹]	1 50	5	5	0,8	1,5	0,8	0,5	0,02 40
Tepelná vodivost [W·cm ⁻¹ ·°C ⁻¹ ·10 ³]	70	4	7	90	70	25	300	950 3,6
Součinitel teplotní roztažnosti při 100 °C [10 ⁻⁶ ·°C ⁻¹]	0 25	3	2,5	1,5	3	0	0,5 24	-1 25
Propustnost [cm ² ·s ⁻¹]	10 ⁻⁵	10 ⁻¹¹	10	10	10 ⁻¹		10 ⁻¹²	10 ⁻⁵
Tvrdość SHORE	25	100	75	30	50			

Obr. 4 – Tabulka s vlastnostmi rozmanitých forem uhlíkových materiálů [5]

1.3 Získávání uhlíkových materiálů



Obr. 5 – Způsoby získávání uhlíkových materiálů [5]

Uhlíkové materiály jsou definovány Francouzskou společností pro studium uhlíku (GFEC) jako libovolná pevná forma uhlíku černé barvy, obsahující eventuálně ve stopovém množství další atomy. Podle této definice jsou všechny uhlíkové materiály, kromě přírodního grafitu, získávány pyrolýzou organických sloučenin. Při výrobě uhlíkových materiálů představují pyrolýza spolu s grafitizací dvě zásadní stádia. Následující schéma, znázorněné na obr. 5, popisuje vztahy mezi výchozími surovinami, tepelným zpracováním a výslednými materiály [5].

1.3.1 Pyrolýza, karbonizace, koksování

Pyrolýzou se rozumí termální rozklad organických sloučenin, jako jsou uhlí, ropa, smoly, polymery a uhlovodíky v nepřítomnosti dalších chemických činitelů. Pyrolýza může probíhat několika způsoby:

- a) Za postupného zvyšování teploty v rozsahu od 200 °C do 1000 °C (eventuálně do 1600 °C). Pokud probíhá v kondenzovaném stavu, vede k výrobě koksů nebo karbonizátů, v závislosti na tom, dochází-li k měknutí materiálu a jeho zkapalnění. Pokud ano, jedná se o koksování, v opačném případě se jedná o karbonizaci. Poslední stadium pyrolýzy spočívá v odstranění zbytkových heteroatomů (především vodíku).
- b) Přímou vysokoteplotní cestou (nad 1000 °C). Takto provedená pyrolýza vede ke vzniku rozptýlených agregátů – uhlíkových černí nebo ke kompaktnímu pyrolytickému uhlíku [5].

1.3.2 Grafitace

V aromatických lamelách vytvořených během pyrolýzy jsou již atomy grafitu uspořádány do hexagonálního motivu. Tyto lamely se pak stávají součástí shluků, které vedou k vytvoření krystalitů, které mají před grafitací délku jen několika setin mikrometrů, větší mezilamelární vzdálenost a nedokonalé uspořádání grafenových vrstev kolem svislé osy (tzv. turbostratické uspořádání). Vzniklé grafenové vrstvy obsahují také množství defektů.

Samotná grafitace je charakterizována eliminací defektů v grafenových rovinách, nárůstem velikosti krystalitů, poklesem mezilamelární vzdálenosti a zlepšením trojrozměrného uspořádání rovin. K tomu dochází při teplotách vyšších než 2000 °C, zejména ovšem mezi teplotami 2500 °C a 3000 °C. Takto vzniklé krystaly nejsou dokonalé, a úroveň transformace závisí především na předchozí orientaci krystalitů, která je utvořena již během pyrolýzy [7].

1.4 Uhlíková vlákna

Uhlíková vlákna nemohou být vyráběna stejným způsobem jako vlákna kovová, skelná, křemenná nebo vlákna polymerů, vzhledem k tomu, že uhlík netaje, není tažný a je dokonce odolný vůči rozpouštědlům. Proto se uhlíková vlákna vyrábí řízenou pyrolýzou organických prekurzorů, které mají formu vláken nebo přímo textilií či plstí. Další možností výroby uhlíkových vláken je katalytický rozklad plyných uhlovodíků [5].

1.4.1 Uhlíková vlákna nižších parametrů

Pro uhlíková vlákna nižších parametrů je charakteristická pevnost v tahu nižší než 1000 MPa a modul pružnosti v tahu nižší než 100 GPa. Bývají vyráběny ve formě vláken, ale také přímo textilií a plstí a slouží především jako tepelná izolace, elektromagnetické stínění a k výrobě levných předmětů, případně jako výztuž do betonu. Pokud se ovšem v obecné mluvě mluví o uhlíkových vláknech, myslí se označením „uhlíková vlákna“ uhlíková vlákna s vysokými parametry [5], [8].

1.4.2 Uhlíková vlákna s vysokými mechanickými parametry

Pro tato uhlíková vlákna je charakteristická pevnost v tahu 3,5 – 7 GPa a modul pružnosti 230 – 930 GPa. Patří sem vlákna na bázi PAN (polyakrylonitrilu), vlákna z mezofázových smol a vlákna charakteru whiskerů (VGCF - Vapor Grown Carbon Fibers = vlákna získaná výrobou z plynné fáze). Dále se vlákna v této kategorii člení:

- Vysocepevná vlákna (HT Fibers – High Tensile Fibers) – standardně mají tato vlákna modul pružnosti v tahu 230 – 300 GPa a pevnost v tahu 3 – 4 GPa, novější vlákna mohou o stejném modulu vykazovat mnohem vyšší pevnosti (až 7GPa)
- Středně modulová vlákna (IM Fibers – Intermediate Modulus Fibers)
- Vysokomodulová vlákna (HM Fibers – High Modulus Fibers)
- Vlákna se supervysokým modulem (UHM Fibers – Ultrahigh Modulus Fibers)

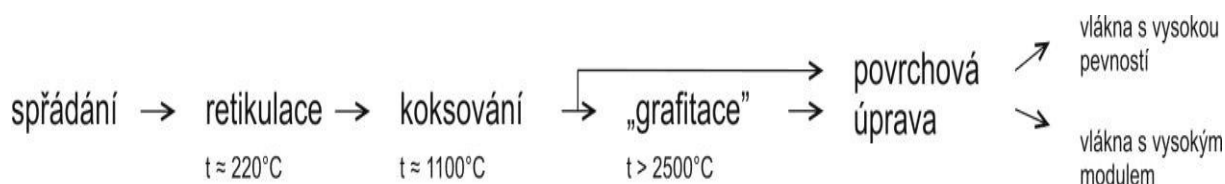
Vysokých pevností se dosahuje u vláken na bázi PAN, zatímco vysokého modulu především u vláken vyráběných z mezofázových smol [8].

1.5 Výroba uhlíkových vláken

Způsob výroby uhlíkových vláken se liší v závislosti na použitém prekurzoru. V praxi se lze tedy setkat s rozdílnými výrobními postupy u vláken na bázi PAN, smoly a mezofáze, celulózy a vláken charakteru whiskerů, připravovaných katalytickým rozkladem plynných uhlovodíků. Teoreticky je možné vyrábět uhlíková vlákna i z dalších prekurzorů, ty však většinou nejsou z ekonomického hlediska konkurenceschopné [5], [7].

1.5.1 Výroba vláken na bázi PAN

Vlákna na bázi PAN (polyakrylonitrilu) se vyrábějí v široké škále vlastností a tvoří nejvýznamnější část produkce uhlíkových vláken. Jako prekurzor je použito akrylové vlákno, na které jsou kladeny speciální požadavky. Vzhledem k požadavku získat co nejvyšší pevnost a modul pružnosti podél osy výsledného vlákna, je nutné uspořádat silné vazby mezi atomy uhlíku právě do tohoto směru. Postup výroby PAN vláken je znázorněn na obr. 6.



pozn.: termín grafitace je v tomto případě nepřesný, protože prekurzor je negrafitovatelný, ovšem je široce používaný

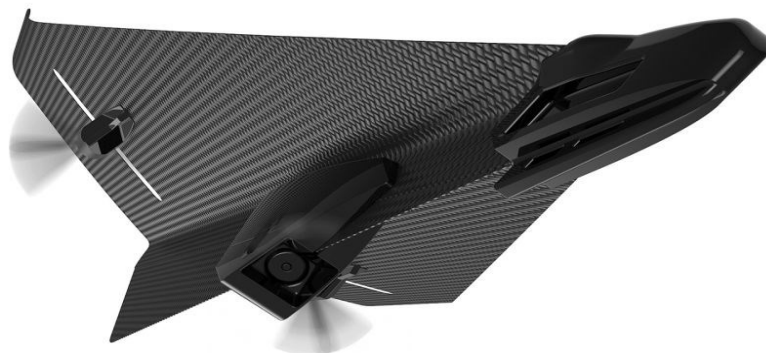
Obr. 6 – Schéma výroby vláken PAN [5]

1.5.2 Výroba na bázi smol a mezofáze

Prekurzorem mohou být jak černouhelné tak ropné smoly, ale také smoly vyrobené pyrolyzou aromatických sloučenin, jako je naftalen nebo PVC a další. Oproti vláknům PAN mají vlákna na bázi mezofáze vyšší výtěžnost při karbonizaci (až 80%), ovšem celkové náklady na výrobu jsou vyšší díky komplikovanější výrobě. Přesto se však základní schéma výroby příliš neliší od výroby vláken PAN. Vlákna na bázi smol mohou být buď izotropní s jen průměrnými vlastnostmi, nebo vysoce orientované [7].

1.5.3 Použití uhlíkových vláken

Uhlíková vlákna se používají především k výrobě kompozitů, ale také nachází uplatnění jako samostatný materiál. Vlákna na bázi PAN s oxidovaným povrchem jsou nehořlavá, proto nahrazují v mnoha oblastech asbest. Uhlíková vlákna jsou také součástí sedadel v letadlech, kde brání vzplanutí polyuretanové pěny, která při hoření uvolňuje toxické látky.



Obr. 7 – RC model kompletně vyrobený z uhlíkového kompozitu [16]

Textilie z takových uhlíkových vláken dokážou odolat ohni o teplotě 900 °C po dobu pěti minut, mají nízkou tepelnou vodivost a poskytují výbornou ochranu před proudem tekutých kovů či jiskrami při svařování. Proto se z nich také vyrábí ochranné pracovní pomůcky či součásti výstroje pro hasiče. Dále je možno využít surová uhlíková vlákna v „aktivní“ podobě. V tomto případě se jedná o analogii aktivního uhlí, a nacházejí použití jako součásti filtrů, ať už v plynových maskách, klimatizační technice nebo v medicíně pro čištění krve.

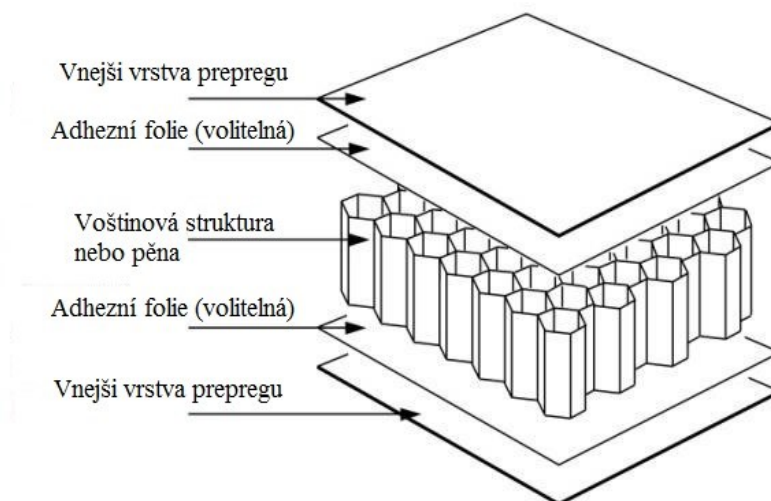
Surová uhlíková vlákna (především grafitická vlákna s vysokým modulem – očekává se u nich lepší biokompatibilita) mají i další použití v medicíně jako náhrady šlach a vaziv nebo jako základ kostních náhrad [7].



Obr. 8 – Kostní výztuže a náhrady z uhlíkového kompozitu [17]

Kompozity s uhlíkovými vlákny a polymerní matricí nachází široké uplatnění prakticky ve všech oblastech lidské činnosti, ať už pro své výjimečné vlastnosti nebo pro svůj vzhled, jako je tomu v případě výroby těl luxusních plnicích per či přílozek zavíracích nožů. V případě tenkostěnných konstrukcí se používají pouze kompozity vlákno – pryskyřice, ovšem jinak je tomu tam, kde je zapotřebí dosáhnout většího průřezu.

V tomto případě se s výhodou používá sendvičové konstrukce, která umožňuje mnohonásobné zvýšení pevnosti a tuhosti a také jisté zlepšení rázové odolnosti při zachování nízké váhy. Sendvič je tvořen jádrem z lehkého materiálu, které je obaleno laminátem s adhezivním filmem pro zajištění dobrého spojení. Jako materiál jádra se používá pěny z PVC, PS, PU, polykarbonátu a dalších plastů, balzy nebo kovové (nejčastěji hliníkové) či kompozitní (např. z aramidového papíru napuštěného pryskyřicí) voštinové struktury (označované jako „honeycomb“), která připomíná plástek medu, ovšem dutiny mohou být buď čtvercové, nebo šestiúhelníkové. Typická sendvičová struktura je zobrazena na obr. 9 [5], [7], [9].



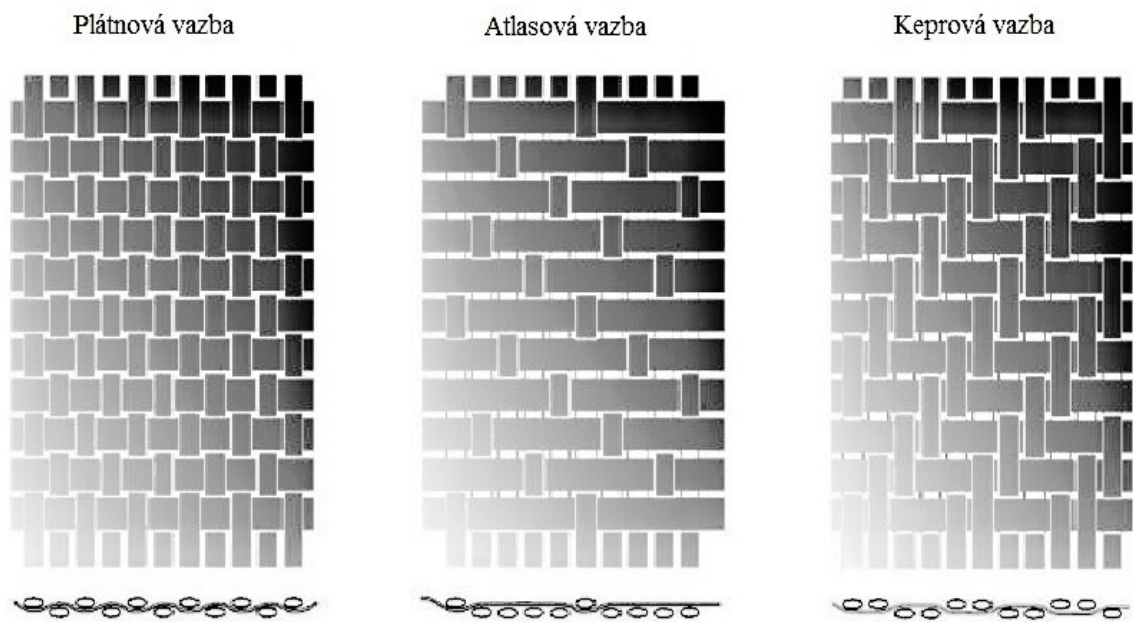
Obr. 9 - Sendvičová struktura, zde s voštinovým jádrem „honeycomb“ [9]

1.5.4 Rozmístění uhlíkových vláken v matrici

Rozmístění vláken v matrici má zásadní vliv na vlastnosti výsledného kompozitu. Výrobně nejjednodušší možností je rozptýlit „nasekaná“ vlákna volně v matrici, nebo je sestavit do „štůčků“. Tyto kompozity však zdaleka nedosahují mechanických charakteristik kompozitů, kde jsou vlákna vhodně uspořádána. Další možností je jednosměrné umístění vláken (UD – Unidirectional), kdy výsledný kompozit má velmi vysoké pevnostní charakteristiky ve směru vláken. Naopak ve směru kolmém jsou nízké, poněvadž celé zatížení kompozitu přenáší pouze matrice. Pro odstranění této nevýhody jsou používány tkané a pletené textilie z uhlíkových vláken, které rozkládají zatížení do více směrů. Existuje nespočet vzorů, které se liší svojí složitostí – od dvousměrných textilií, až po pětisměrné zaplétané textilie. Anglická literatura rozeznává pojmy „crimp“ (zvlnění) a „drapeability“ (splývavost), které charakterizují konkrétní textilii. Vysoké zvlnění znamená, že vlákna jsou značně zaplétaná a zprohýbaná, a tudíž nedokážou přenést tak vysoká zatížení, jako vlákna rovná.

Nižší je rovněž i tuhost konstrukce. Splývavost vyjadřuje schopnost textilie snadno se tvarovat a přilnout k modelu, na který se tvaruje. Často jsou tyto vlastnosti protichůdné.

Nejběžnější způsoby tkání jsou naznačeny na obr. 10. [5], [7], [9].



Obr. 10 – Nejběžnější provedení dvousměrného tkaní [10]

2 MECHANICKÉ VLASTNOSTI POLYMERNÍCH KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ A JEJICH HODNOCENÍ

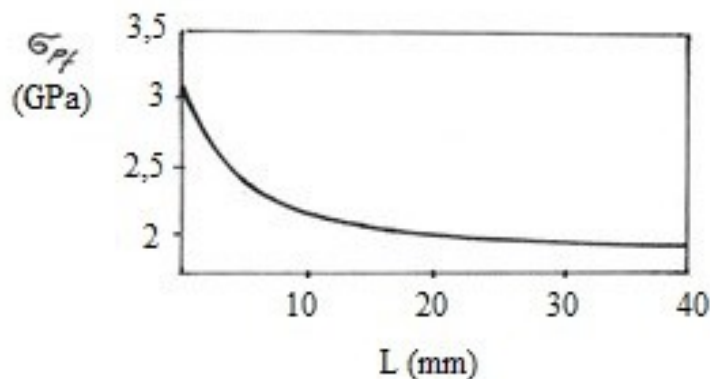
2.1 Mechanické vlastnosti vláken

Materiálové pevnostní charakteristiky jsou determinovány přítomností nadkritických poruch, kde vzniká a odkud se šíří trhlina, vedoucí finálně k lomu. Je zřejmé, že absolutní počet těchto poruch závisí na objemu materiálu, tj. jeho rozměrech. U vláken uvedenou skutečnost vyjadřuje Griffitův vztah, který je možné psát ve tvaru:

$$\sigma_{Pf} = A + \frac{B}{d} \quad (1)$$

kde A a B jsou materiálové konstanty a d je průměr vlákna.

Griffitův vztah má samozřejmě omezenou platnost v krajní poloze, protože pro $d \rightarrow 0$ by pevnost rostla nad všechny meze $\sigma_{Pt} \rightarrow \infty$. Ve skutečnosti můžeme překročit tak zvanou teoretickou pevnost $\sigma_{teor} \doteq E/10$. Největší pevnost mají tzv. whiskery, což jsou monokrystalická kovová vlákna průměru $d \doteq 1\mu\text{m}$ a délky $l \doteq 3 - 4\text{mm}$. U tenkých vláken se projevuje negativní vliv délky vlákna na mez pevnosti σ_{Pf} v důsledku větší pravděpodobnosti poruch u delšího vlákna. Tuto skutečnost dokumentuje experimentálně zjištěná závislost σ_{Pf} na délce vlákna l pro tenké skleněné vlákno typu E o průměru $d = 5 - 20\mu\text{m}$



Obr. 11- Závislost meze pevnosti vlákna na jeho délce [11]

Vlákna se technologicky vyrábějí ve svazcích a mají náhodné rozdělení poruch, které způsobují lokální koncentraci napětí a mají i poněkud odlišné rozměry. Některá vlákna ve svazku prasknou již při začátku zatěžování. Z těchto důvodů se uvažuje, že je průměrná pevnost vláken ve svazku menší než jednoho [11].

Tab. 1 – Mechanické vlastnosti vybraných vláken [11]

I	E_t	σ_{Pt}	ρ	σ_{Pt}/ρ	ε_{krit}
	GPa	MPa	10^3 kgm^{-3}	MPa kgm^{-3}	%
Sklo - E	72,4	3500	2,54	1,38	2,5
Sklo - S	85,5	4600	2,48	1,85	2,5
Grafit - E	390	2100	1,9	1,1	0,7
Grafit - S	240	2500	1,9	1,3	0,7
Bor	385	2800	2,63	1,1	0,8
W	414	4200	19,3	0,22	
Aramid Kevlar 49	130	2800	1,5	1,87	2,5
Azbest	160	3100	2,56	1,21	1,9
SiC	250	2200	2,6	0,85	0,9
Polyethylen PE Spektra	172	3000	0,97	3,09	1,7
Ocel	210	340-2500	7,8	0,0440-0,321	

Kde E_t je modul pružnosti v tahu, σ_{Pt} je pevnost v tahu, ρ je hustota, σ_{Pt}/ρ je měrná pevnost a ε_{krit} je tažnost.

2.2 Technologie výroby vybraných vláken

Výroba kompozitních vláken patří většinou do kategorie pokročilých výrobních technologií a bývá předmětem ochrany duševního vlastnictví. Výchozí materiál (prvek nebo sloučenina) se často liší od finálního materiálu. Samozřejmě musí obsahovat chemické prvky finálního produktu [11].

2.2.1 Skelná vlákna

Tato vlákna se používají především v kompozitech s plastovou maticí. Vlákna se vyrábějí kontinuálně, tzn., že na jednom konci pece se sází sklářský kmen a na druhém se vytahuje vlákno. Potřebný průměr vláken se dosáhne dlužením proudu skla tekoucího tryskami (průměr 1 mm). Konečný průměr závisí na rozdílu vytékání skloviny a odtahování vlákna. Toto vlákno má nejčastěji od 3,5 do 20 μm . Jednotlivá vlákna se sdružují do pramene a navíjí na navíjecí zařízení. Najednou se táhne 51 až 408 vláken.

Vlákno je opatřeno ochrannou vrstvou, která brání vlákno před oxidací a rovněž zvyšuje adhezi a smáčivost organickými matricemi. Skelné vlákno se používá ve dvou základních modifikacích a to typu *S* (vysoce pevné) a typu *E* (vysoce tuhé).

Tepelné vlastnosti skleněných vláken jsou lepší než u jiných materiálů. Dlouhodobé teplotní působení 250 °C nesnižuje hodnoty mechanických vlastností. Jsou nehořlavá a tudíž ohnivzdorná. Modul pružnosti v tahu je přibližně stejný jako u hliníku a činí asi 1/3 hodnoty u oceli. Vzhledem k nižší hustotě skla je hodnota měrné pevnosti vláken velmi vysoká. Součinitel teplotní délkové roztažnosti skleněných vláken je nižší než u většiny konstrukčních materiálů. [11], [12], [13], [14].

Tab. 2 – Pevnosti skleněných vláken [15]

Vlákno	Sklo S	Sklo E	Pyrex
Pevnost výchozí [GPa]	7,0	3,7	2,0
Pevnost po zpracování [GPa]	5,0	2,8	1,6
Prodloužení při lomu [%]	5,0	3,0	2,0

2.2.2 Uhlíková vlákna

Uhlíková vlákna jsou technická vlákna o průměr mezi 5 až 10 μm tvořena převážně atomy uhlíku (přibližně 90 %, zbytek tvoří dusík, kyslík a vodík), které jsou spojeny dohromady v mikroskopické krystaly, jenž formuje samotné vlákno.

Vyrábí se pyrolýzou polyakrylonitrilových vláken PAN. Ta jsou nejprve zahřata a protahována, aby se získala vhodná orientace molekul. Následuje stabilizace v oxidující atmosféře při teplotě 220-230 °C až 10 hod. Potom se pokračuje grafitizací v inertní atmosféře při 1000–1500 °C a dalším protahováním. Dalším technologickým krokem je grafitizace v inertní atmosféře za teplot 2500 – 3000 °C pod napětím.

Pro výrobu uhlíkových vláken se využívá další postup vycházející přímo ze surovin bohatých na uhlík. Výrobou je možné získat celou řadu vláken od vysoce pevných se středním, vysokým nebo extrémně vysokým modulem pružnosti. Uhlíková vlákna jsou považována za nejlepší výztuž pro kompozity, zvláště u materiálu zvaný uhlíkový laminát, kde je požadována nízká hmotnost, ale naopak vysoká odolnost vůči dynamickému namáhání.

Mezi další jejich vlastnosti patří také vysoká korozní odolnost, dobrá elektrická a tepelná vodivost, naopak při delším skladování dochází ke ztrátě jejich ohebnosti a při destrukci vykazují třštivost [11], [15].

2.2.3 Aramidová vlákna

Aramidové vlákno vynalezené a patřící firmě Dupont je známé pod obchodním označením Kevlar 29 resp. Kevlar 49 pro letecké aplikace. Jde o organické vlákno s vysokou pevností a malou měrnou hmotností.

Výroba probíhá spřádáním z vysoko-viskózního 20% roztoku v koncentrované kyselině sírové, následně jsou vlákna spojena a pro zlepšení zpracovatelnosti se mnohokrát propírají, neutralizují a propírají aviváží (pomocný prostředek pro zlepšení kluzných a zpracovatelských vlastností). Předností aramidových vláken je vysoká pevnost a tuhost. Molekuly jsou vzájemně spojeny vazbami vodíkových můstků. Aramidová vlákna se mohou zpracovávat se všemi reaktivními pryskyřicemi i termoplasty. Jsou nejlehčí vyztužující vlákna, z čehož plyne vysoká měrná pevnost v tahu. Aramidová vlákna ve formě kompozitu odolávají teplotě až 300 °C a neroztaví se, proto jsou vhodná pro protipožární ochranné obleky nebo neprůstřelné vesty [11], [15].

2.3 Srovnání skelných, uhlíkových a aramidových vláken

Vlastnosti nejdůležitějších vyztužujících vláken se liší nejen navzájem, ale také v závislosti na vlastnostech matrice, ve které jsou vlákna zabudována. Kromě anizotropie mechanických vlastností jsou to především hodnoty součinitelů teplotní roztažnosti.

U všech typů matic jsou hodnoty součinitelů teplotní roztažnosti kladné a to přibližně $100 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, zatímco u skleněných vláken je tato hodnota $5 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ u aramidových a uhlíkových vláken jsou tyto hodnoty dokonce záporné. To umožňuje aplikaci dílů s velkou rozměrovou stálostí i při střídavých teplotách.

Chemická odolnost kompozitů je závislá na druhu matrice, avšak vlákna mohou být silně poškozena pronikajícími agresivními médii. Uhlíková vlákna jsou inertní, zatímco skleněná a aramidová vlákna vykazují v kyselém i alkalickém prostředí pokles pevnosti. Uhlíková vlákna jsou elektricky vodivá, zatímco skleněná a aramidová vlákna vykazují velký elektrický odpor [15].

Tab. 3 – Srovnání vlastností vybraných kompozitů [15]

Vlastnosti	Vlákna		
	Skleněná	Aramidová	Uhlíková
Hustota	+ -	++	+
Mez pevnosti v tahu	+	+	+
E-modul	-	+	++
Mez pevnosti v tlaku	+	-	+
Rázová houževnatost	+	+	-
Tlumení	-	+	-
Chování při statickém a dynamickém namáhání	+	+	++
Dielektrické vlastnosti	++	++	-
Adheze, přilnavost	++	-	+
Nasákavost	+	-	+
Cena	++	+ -	-

3 VLIV TEPLoty NA MECHANICKÉ VLASTNOSTI POLYMERNÍCH KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ, PŘÍKLADY ŘEŠENÍ

Zatímco se materiály matrice a skleněné vlákno s rostoucí teplotou ve všech směrech roztahují, aramidová a uhlíková vlákna se smršťují ve směru vlákna a roztahují ve směru kolmo na směr vlákna (tab. 4).

Tab. 4 – Součinitelé teplotní roztažnosti různých složek kompozitu [15]

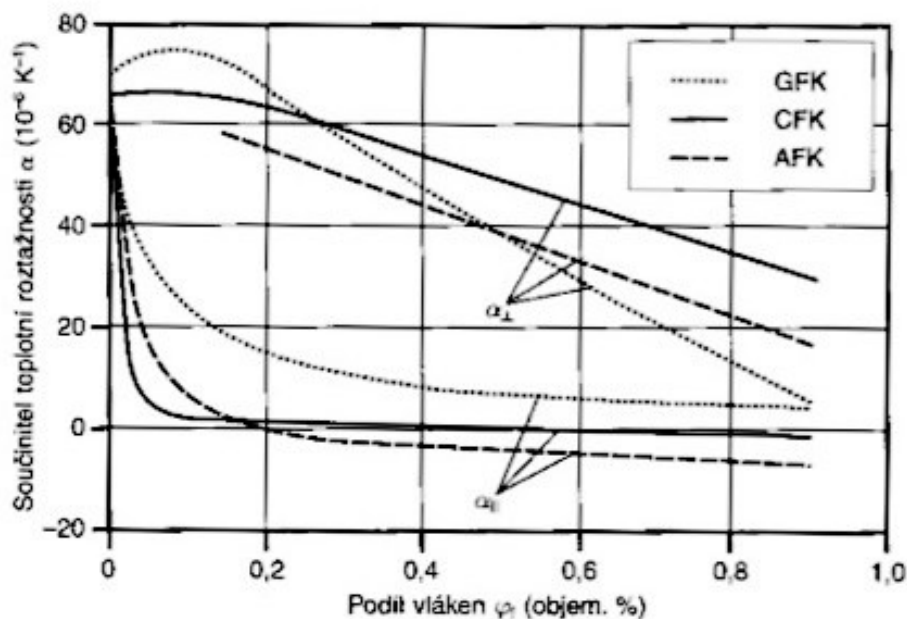
Materiál		Součinitel teplotní roztažnosti $10^{-6}K^{-1}$	
		$\alpha_{\parallel f}$	$\alpha_{\perp f}$
Matrice		70 až 200	
Vlákno	skleněné	4,6	4,6
	uhlíkové	-0,1 až -1,5	10 až 15
	aramidové	-1 až -4	40 až 60

Laminát typu jednosměrné vyztužené vrstvy je kombinací materiálu vlákna a matrice. Vlákna mají ve srovnání s matricí výrazně nižší součinitel teplotní roztažnosti (tab. 4), a proto při zvýšení teploty brání ve směru svého uložení matrici ve snaze se roztáhnout. V případě uhlíkových a aramidových vláken mohou dokonce vyvolat negativní roztažení (tedy smrštění).

V případě, že je negativní součinitel teplotní roztažnosti při větší tuhosti vlákna malý, je ve velkém rozsahu objemového podílu vláken součinitel teplotní, roztažnosti laminátu ve směru vláken přibližně konstantní. Pro uhlíkové kompozity je přibližně roven nule a nedochází tak k teplotnímu roztažení.

Kolmo ke směru vlákna se střídavě mění oblast matrice a vlákna. Vlivem sériového uspořádání složek dochází k superpozici jejich roztažení. Součinitel teplotní roztažnosti vláken ve směru příčném je vždy menší než součinitel teplotní roztažnosti matrice. Teplotní dilatace jednosměrně vyztuženého laminátu ve směru kolmém k vláknům s rostoucím obsahem vláken klesá až na výjimku oblasti s velmi malým objemovým podílem vláken (obr. 12).

Tato anomálie je způsobena tím, že matrice je při změně teploty $\Delta T > 0$ ve směru vláken namáhána tlakem, což při relativně vysoké hodnotě Poissonova Číslo matrice, způsobí prodloužení ve směru příčném, a tedy dosažení vyšší hodnoty součinitele roztažnosti, než má jeho samotná matrice. Při vyšším obsahu vláken převáží účinek výrazně nižšího součinitele teplotní roztažnosti vláken [15].



Obr. 12 – Závislost součinitele teplotní roztažnosti jednosměrně vyztuženého kompozitu skleněným (GFK), uhlíkovým (CFK) a aramidovým (AFK) vláknem na objemovém podílu vláken [15]

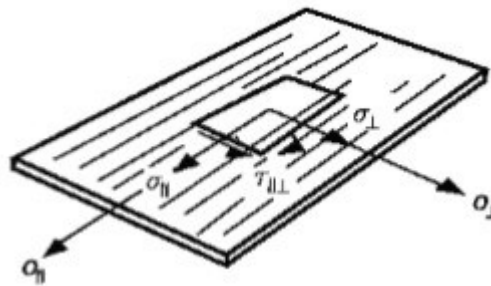
3.1 Teplotní hranice použití vyztužených plastů

Teplotní hranice použití vyztužených plastů jsou určovány teplotou, při níž dochází ke značné ztrátě tuhosti matrice. Obvyklým způsobem stanovení této hranice je vyšetření závislosti modulu pružnosti na teplotě. Zatímco modul vláken E_f se s teplotou v oblastech použití prakticky nemění, je u termosetu a termoplastu možný jeho pokles až o 3 řády. Ztráta tuhosti se váže na reverzibilní uvolnění fyzikálních vazeb, přičemž u termosetu chemické vazby zůstávají zachovány. Teplota skelného přechodu je jako bod největší změny vlastností málo vhodný pro definici hranice mezního použití kompozitních materiálu, protože k poklesu mechanických vlastností dochází již při značně nižších teplotách [15].

3.2 Teplotní roztažnost jednosměrně vyztužené vrstvy

V jednosměrně vyztužené vrstvě jsou vlákna v matrici navzájem rovnoběžná (obr. 13). Při tomto uspořádání má kompozit ve směru vláken mnohem větší pevnost a tuhost než ve směru kolmo k vláknům.

Tento typ anizotropie vlastností se nazývá ortotropie (je charakterizován vzájemně kolmo orientovanými osami symetrie materiálových vlastností).



Obr. 13 - Roviny symetrie jednosměrně vyztužené vrstvy [15]

K popisu chování jednosměrně vyztužené vrstvy při zatížení σ_{II} , σ_{\perp} , $\tau_{II\perp}$ (tj. v osách souřadnic o_{II} a o_{\perp}) je potřeba více elastických konstant, a to moduly pružnosti ve směru vláken (E_{II}), ve směru kolmo k vláknům (E_{\perp}), ve smyku ($G_{II\perp}$); $\nu_{II\perp}$ a $\nu_{\perp II}$ jsou Poissonova čísla, vzájemně se výrazně lišící.

Při zatížení napětím σ_{\perp} zabraňují příčně uložená tuhá vlákna příčné deformaci, čímž je $\nu_{\perp II}$ mnohem větší než $\nu_{II\perp}$.

Změny teploty způsobují změnu rozměrů. Poměrné prodloužení ε v důsledku tepelné změny ΔT : $\varepsilon = \alpha \Delta T$,

Kde je α – součinitel lineární teplotní roztažnosti materiálu

V případě ortotropního materiálu, např. jednosměrně vyztužené vrstvy, je deformace způsobená teplotou závislá na směru, tzn. je rozdílná ve směru podél a příčně k vláknům:

$$\varepsilon_{II} = \alpha_{II} \Delta T \quad (2)$$

$$\varepsilon_{\perp} = \alpha_{\perp} \Delta T \quad (3)$$

$$\gamma_{II\perp} = \alpha_{II\perp} \Delta T = 0 \quad (4)$$

Součinitelé teplotní roztažnosti ve směru podélném a příčném (α_{II} a α_{\perp}) se vypočítají ze vztahů:

$$\alpha_{II} = \frac{E_m \alpha_m (1-\varphi) + E_{fII} \varphi \cdot \alpha_{fII}}{E_m (1-\varphi) + E_{fII} \varphi} \quad (5)$$

$$\alpha_{\perp} = \alpha_m - (\alpha_m - \alpha_{f\perp})(A - B) \quad (6)$$

kde

$$A = \frac{2(v_m^3 + v_m^2 - v_m - 1) \cdot 1,1\varphi}{1,1\varphi(2v_m^2 + v_m - 1) - (v_m + 1)} \quad (7)$$

$$B = \frac{v_m \frac{E_{f\perp}}{E_m}}{\frac{E_{f\perp}}{E_m} + \frac{1-1,1\varphi}{1,1\varphi}} \quad (8)$$

V případě, že se izotropní těleso může volně roztahovat, ohýbat a zkrucovat, nevznikají v něm vlivem teplotních změn žádné přídavné výsledné síly a ohybové momenty.

Jestliže je element jednosměrně vyztužené vrstvy pravoúhlý s hlavními osami probíhajícími paralelně se stranami elementu, nemění se původní pravoúhlý tvar elementu, tj. součinitel změny tvaru $\alpha_{II\perp} = 0$.

Součinitele teplotní roztažnosti α_1 , α_2 a α_{12} lze získat pomocí transformačních rovnic v libovolném systému souřadnic, neboť pro ne platí stejné transformační pravidlo jako pro poměrné deformace [15]:

$$\alpha_1 = \alpha_{II} m^2 + \alpha_{\perp} n^2 \quad (9)$$

$$\alpha_2 = \alpha_{II} n^2 + \alpha_{\perp} m^2 \quad (10)$$

$$\alpha_{12} = -(\alpha_{II} - \alpha_{\perp}) 2mn \quad (11)$$

kde je

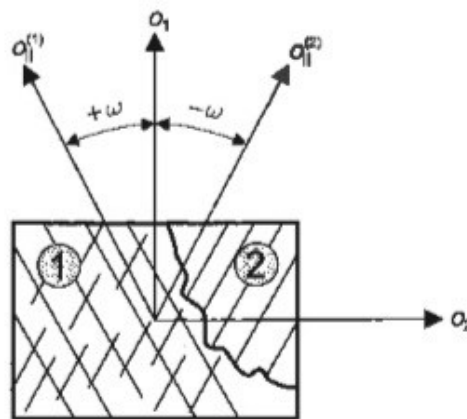
$$m = \cos \omega \quad (12)$$

$$n = \sin \omega \quad (13)$$

3.3 Teplotní roztažnost rovnovážné dvojvrstvy

V případě, že se dvě stejné jednosměrně vyztužené vrstvy odchylují o stejný úhel v obou směrech od hlavních o_1 a o_2 systému souřadnic, obdržíme tzv. rovnovážnou dvojvrstvu, která vzniká např. při výrobě kompozitní steny vinutím.

Rovnovážná dvojvrstva o celkové tloušťce t se skládá ze dvou identických jednosměrně vyztužených vrstev 1 a 2 (tlouštěk t_1 a t_2 , $t_1 = t_2 = t/2$), jejichž hlavní osy o_{11} , o_{12} jsou pootočené o úhel $\pm\omega$ (obr. 14)



Obr. 14 – Rovnovážná dvojvrstva [15]

V jednotlivé jednosměrně vyztužené vrstvě otočené o úhel ω nastane při změně teploty změna jejich rozměrů a také tvaru. Jsou-li dvě vzájemně pootočené jednosměrně vyztužené vrstvy pevně spojeny, nemohou se volně deformovat, ale vzájemně si v dilataci brání. Tím vznikají při změně teploty v jednotlivých vrstvách teplotní napětí. Výsledná deformace dvojvrstvy je tak výsledkem roztažnosti jednotlivých vrstev a deformací vyvolaných těmito vnitřními napětími.

Tuhosti rovnovážné dvojvrstvy ve směru jejích hlavních os o_1 , o_2 označme \bar{Q}_{11} , \bar{Q}_{22} , \bar{Q}_{12} , \bar{Q}_{66} a součinitele teplotní roztažnosti $\bar{\alpha}_1$ a $\bar{\alpha}_2$. Změna teploty se „mechanicky“ projeví vznikem napětí v důsledku rozdílu dilatací rovnovážné dvojvrstvy jako celku a jednotlivých vrstev. Platí:

$$\varepsilon_{1m}^{(k)} = (\bar{\alpha}_1 - \alpha_1^{(k)})\Delta T \quad (14)$$

$$\varepsilon_{2m}^{(k)} = (\bar{\alpha}_2 - \alpha_2^{(k)})\Delta T \quad (15)$$

$$\gamma_{12m}^{(k)} = (\bar{\alpha}_{12} - \alpha_{12}^{(k)})\Delta T \quad (16)$$

Pro $k = 1, 2$

Deformace vyvolávají v jednotlivých vrstvách následující napětí:

$$\sigma_1^{(k)} = Q_{11}^{(k)} \varepsilon_{1m}^{(k)} + Q_{12}^{(k)} \varepsilon_{2m}^{(k)} + Q_{16}^{(k)} \gamma_{12m}^{(k)} \quad (17)$$

$$\sigma_2^{(k)} = Q_{16}^{(k)} \varepsilon_{1m}^{(k)} + Q_{26}^{(k)} \varepsilon_{2m}^{(k)} + Q_{26}^{(k)} \gamma_{12m}^{(k)} \quad (18)$$

$$\tau_{12}^{(k)} = Q_{16}^{(k)} \varepsilon_{1m}^{(k)} + Q_{26}^{(k)} \varepsilon_{2m}^{(k)} + Q_{66}^{(k)} \gamma_{12m}^{(k)} \quad (19)$$

Na rovnovážnou dvojvrstvu nepůsobí žádné vnější napětí, platí podmínky rovnováhy:

$$\sum_{k=1}^2 \frac{t_k}{t} \cdot \sigma_1^{(k)} = 0 \quad (20)$$

$$\sum_{k=1}^2 \frac{t_k}{t} \cdot \sigma_2^{(k)} = 0 \quad (21)$$

$$\sum_{k=1}^2 \frac{t_k}{t} \cdot \tau_{12}^{(k)} = 0 \quad (22)$$

kde je

t – celková tloušťka,

t_k – tloušťka jednotlivé vrstvy.

Osy o_1, o_2 jsou osami ortotropie rovnovážné dvojvrstvy, proto $\bar{\alpha}_{12} = 0$. Po dosazení a úpravě se získají vztahy:

$$\bar{\alpha}_1 \sum_{k=1}^2 Q_{11}^{(k)} + \bar{\alpha}_2 \sum_{k=1}^2 Q_{12}^{(k)} = \sum_{k=1}^2 Q_{11}^{(k)} \alpha_1^{(k)} + \sum_{k=1}^2 Q_{12}^{(k)} \alpha_2^{(k)} + \sum_{k=1}^2 Q_{16}^{(k)} \alpha_{12}^{(k)} \quad (23)$$

$$\bar{\alpha}_1 \sum_{k=1}^2 Q_{12}^{(k)} + \bar{\alpha}_2 \sum_{k=1}^2 Q_{22}^{(k)} = \sum_{k=1}^2 Q_{12}^{(k)} \alpha_1^{(k)} + \sum_{k=1}^2 Q_{22}^{(k)} \alpha_2^{(k)} + \sum_{k=1}^2 Q_{26}^{(k)} \alpha_{12}^{(k)} \quad (24)$$

$$\bar{\alpha}_1 \sum_{k=1}^2 Q_{16}^{(k)} + \bar{\alpha}_2 \sum_{k=1}^2 Q_{26}^{(k)} = \sum_{k=1}^2 Q_{16}^{(k)} \alpha_1^{(k)} + \sum_{k=1}^2 Q_{26}^{(k)} \alpha_2^{(k)} + \sum_{k=1}^2 Q_{66}^{(k)} \alpha_{12}^{(k)} \quad (25)$$

kde součinitelé u $\bar{\alpha}_1$ a $\bar{\alpha}_2$ jsou celkové tuhosti rovnovážné dvojvrstvy. Lze je stanovit z tuhostí jednotlivých vrstev.

Protože $Q_{16}^{(k)}$, $Q_{26}^{(k)}$ a $\alpha_{12}^{(k)}$ jsou liché funkce $\sin \omega$, je

$$Q_{16}^{(1)} = -Q_{16}^{(2)} \quad Q_{26}^{(1)} = -Q_{26}^{(2)} \quad \alpha_{12}^{(1)} = -\alpha_{12}^{(2)}$$

Tedy všechny členy ve třetím řádku jsou rovny nule. Zbývající dvě rovnice pro $\bar{\alpha}_1$ a $\bar{\alpha}_2$ budou mít s ohledem na vztahy tvar

$$\bar{\alpha}_1 Q_{11} + \bar{\alpha}_2 Q_{12} = T_1 \quad (26)$$

$$\bar{\alpha}_1 Q_{12} + \bar{\alpha}_2 Q_{22} = T_2 \quad (27)$$

kde je

$$T_1 = Q_{11}\alpha_1 + Q_{12}\alpha_2 + Q_{16}\alpha_{12} \quad (28)$$

$$T_2 = Q_{11}\alpha_1 + Q_{22}\alpha_2 + Q_{26}\alpha_{12} \quad (29)$$

Odtud plyne po dosazení vztah mezi součiniteli teplotní roztažnosti rovnovážné dvojvrstvy $\bar{\alpha}_1$, $\bar{\alpha}_2$ a vlastnostmi jednotlivých vrstev ve směru jejich os symetrie [15]:

$$\bar{\alpha}_1 = \alpha_1 \frac{Q_{16}Q_{22} - Q_{26}Q_{12}}{Q_{11}Q_{22} - Q_{12}^2} \alpha_{12} \quad (30)$$

$$\bar{\alpha}_2 = \alpha_2 \frac{Q_{26}Q_{11} - Q_{16}Q_{12}}{Q_{11}Q_{22} - Q_{12}^2} \alpha_{12} \quad (31)$$

3.4 Teplotní roztažnost křížně vyztuženého kompozitu

Křížně vyztužený kompozit je složen ze dvou na sebe kolmých jednosměrně vyztužených vrstev, které mohou mít různou tloušťku, různá vyztužující vlákna a různý objemový podíl vláken. Proto jsou jejich elastické konstanty rozdílné. Osy o_1 , o_2 jsou osami ortotropie obou vrstev, a tedy i celkového kompozitu.

Součinitelé teplotní roztažnosti křížně vyztuženého kompozitu jsou $\bar{\alpha}_1$, $\bar{\alpha}_2$, $\bar{\alpha}_{12}$, součinitelé jednotlivých vrstev (ve vztahu k orientaci vláken) $\alpha^{(i)}_{II}$ a $\alpha^{(i)\perp}$ ($i=1,2$). Pokud osy ortotropie jednotlivých vrstev souhlasí s osami o_1 , o_2 je $\bar{\alpha}_{12} = 0$. Při změně teploty ΔT vzniknou ve vrstvách teplotní deformace, které vyvolávají napětí.

$$\varepsilon_{m1}^{(1)} = (\bar{\alpha}_1 - \alpha_{II}^{(1)})\Delta T \quad (32), \quad \varepsilon_{m1}^{(2)} = (\bar{\alpha}_1 - \alpha_{\perp}^{(2)})\Delta T \quad (33)$$

$$\varepsilon_{m2}^{(1)} = (\bar{\alpha}_2 - \alpha_{\perp}^{(1)})\Delta T \quad (34), \quad \varepsilon_{m2}^{(2)} = (\bar{\alpha}_2 - \alpha_{II}^{(2)})\Delta T \quad (35)$$

Protože neexistuje vnější zatížení, musí být součet vnitřních sil v důsledku změny teploty roven nule. Podmínka rovnováhy pak zní:

$$Q_{11}^{(1)}(\bar{\alpha}_1 - \alpha_{II}^{(1)})\frac{t_1}{t} + Q_{12}^{(1)}(\bar{\alpha}_2 - \alpha_{\perp}^{(1)})\frac{t_1}{t} + Q_{11}^{(2)}(\bar{\alpha}_1 - \alpha_{\perp}^{(2)})\frac{t_2}{t} + Q_{12}^{(2)}(\bar{\alpha}_2 - \alpha_{II}^{(2)})\frac{t_2}{t} = 0 \quad (36)$$

$$Q_{12}^{(1)}(\bar{\alpha}_1 - \alpha_{II}^{(1)})\frac{t_1}{t} + Q_{22}^{(1)}(\bar{\alpha}_2 - \alpha_{\perp}^{(1)})\frac{t_1}{t} + Q_{12}^{(2)}(\bar{\alpha}_1 - \alpha_{\perp}^{(2)})\frac{t_2}{t} + Q_{22}^{(2)}(\bar{\alpha}_2 - \alpha_{II}^{(2)})\frac{t_2}{t} = 0 \quad (37)$$

Jsou-li celkové tuhosti křížně vyztuženého kompozitu \bar{Q}_{11} , \bar{Q}_{22} , \bar{Q}_{12} , pak lze rovnice upravit do tvaru

$$\bar{\alpha}_1 \bar{Q}_{11} + \bar{\alpha}_2 \bar{Q}_{12} = R_1 \quad (38), \quad \bar{\alpha}_2 \bar{Q}_{12} + \bar{\alpha}_2 \bar{Q}_{22} = R_2 \quad (39)$$

kde

$$R_1 = \left(\alpha_{II}^{(1)} Q_{11}^{(1)} + \alpha_{\perp}^{(1)} Q_{12}^{(1)} \right) \frac{t_1}{t} + \left(\alpha_{II}^{(2)} Q_{12}^{(2)} + \alpha_{\perp}^{(2)} Q_{11}^{(2)} \right) \frac{t_2}{t} \quad (40)$$

$$R_2 = \left(\alpha_{II}^{(1)} Q_{12}^{(1)} + \alpha_{\perp}^{(1)} Q_{22}^{(1)} \right) \frac{t_1}{t} + \left(\alpha_{\perp}^{(2)} Q_{12}^{(2)} + \alpha_{II}^{(2)} Q_{22}^{(2)} \right) \frac{t_2}{t} \quad (41)$$

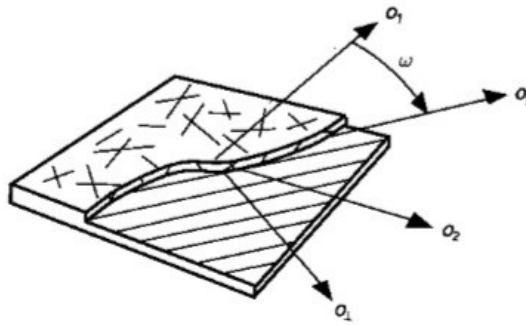
Z těchto vztahů lze snadno stanovit součinitele teplotní roztažnosti křížně vyztuženého kompozitu [15]:

$$\bar{\alpha}_1 = \frac{R_1 \bar{Q}_{22} - R_2 \bar{Q}_{12}}{\bar{Q}_{11} \bar{Q}_{22} - \bar{Q}_{12}^2} \quad (42)$$

$$\bar{\alpha}_2 = \frac{R_2 \bar{Q}_{11} - R_1 \bar{Q}_{12}}{\bar{Q}_{11} \bar{Q}_{22} - \bar{Q}_{12}^2} \quad (43)$$

3.5 Teplotní roztažnost vrstvy vyztužené rohoží

Lamináty vyztužené rohoží se vyznačují chaoticky rozloženou výztuží i z vláken o délce 10 až 50 min. Můžeme tedy předpokládat, že obsah vláken je ve všech směrech stejný a laminát má ve všech směrech stejné vlastnosti. Takovou kompozitní vrstvu můžeme považovat za rovinně izotropní kontinuum. Na rohožovou vrstvu můžeme pohlížet jako na hraniční případ vícevrstvého kompozitu, složeného z nekonečně mnoha jednosměrně vyztužených, rovnoměrně vzájemně pootočených vrstev (obr. 15).



Obr. 15 – Model rohožové vrstvy [15]

Z transformačních vzorců pro součinitele teplotní roztažnosti vyplývá, že materiál se v případě rovnosti součinitelů teplotní roztažnosti $\alpha_{II} = \alpha_{\perp}$ chová jako izotropní. Pokud jsou v jedné rohožové vrstvě jednosměrně vyztužené vrstvy uspořádány tak, že lze dvě vzájemně kolmo orientované vrstvy spojit ve vrstvu jedinou, je vrstva vyztužená rohoží složena z počtu nekonečně mnoha vrstev rovnovážně křížně vyztuženého kompozitu.

Tyto vrstvy se při změně teploty deformují stejně ve směru svých os ortotropie. Nezáleží tedy, jak jsou tyto dvojvrstvy orientovány, roztahují se všechny shodně, tak jako celá vrstva vyztužená rohoží. Z toho důvodu lze postup odvození vztahu pro stanovení součinitele roztažnosti rovnovážně křížně vyztužené dvojvrstvy využít pro určení součinitele teplotní roztažnosti vrstvy vyztužené rohoží. Do vztahu je třeba dosadit hodnoty elastic- kých charakteristik jednosměrně vyztuženého kompozitu majícího stejný obsah vláken jako kompozit vyztužený rohoží [15]:

$$\bar{\alpha} = \alpha_{\perp} + \frac{(\alpha_{II} - \alpha_{\perp})(E_{II} + \nu_{II\perp}E_{II})}{E_{II} + E_{\perp}(1 + 2\nu_{II\perp})} \quad (44)$$

II. PRAKTICKÁ ČÁST

4 CÍLE PRAKTICKÉ ČÁSTI

Na základě poznatků z teoretické části zpracuji praktickou část podle následujících cílů. Cílem praktické části je vytvořit systémy uhlíkového kompozitu a následně experimentálně ověřit jejich mechanické vlastnosti při různých teplotách. Systém bude obsahovat vždy 4 vrstvy tkaniny. Použitá tkanina bude vždy totožná, z důvodů zachování stejných podmínek. Systémy budou od sebe odlišné pouze použitou pryskyřicí a tužidlem. Systémy budou následně podrobeny mechanickým zkouškám dle předepsané normy a výsledky testů budou vzájemně porovnány a prodiskutovány. Mechanické vlastnosti těchto systémů budou podrobeny zkoušce na stanovení tahových vlastností a zkoušce na stanovení ohybových vlastností. Tyto zkoušky by měly potvrdit vliv teploty na mechanické vlastnosti uhlíkových kompozitních systémů.

Postup praktické části:

- Volba materiálového složení kompozitních systémů
- Výroba kompozitních systémů ručním laminováním
- Experimentální testování termomechanického zatížení dle stanovených norem
- Zhodnocení dosažených výsledků

5 MATERIÁLOVÉ SLOŽENÍ KOMPOZITNÍCH SYSTÉMŮ

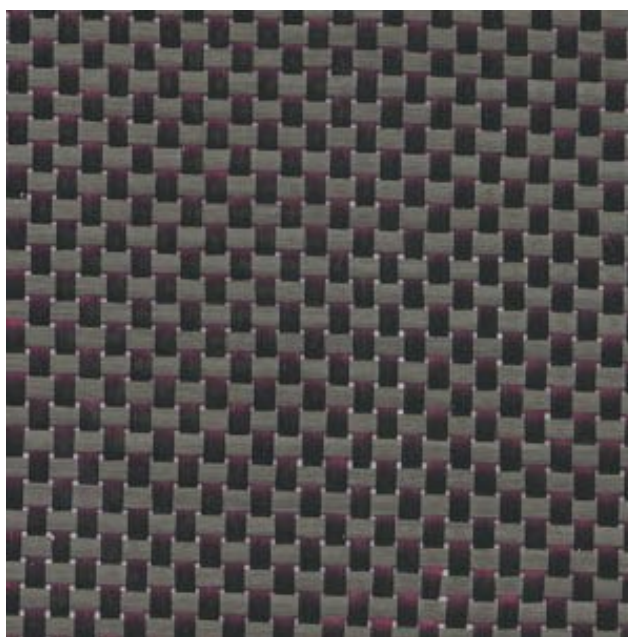
Složení kompozitních systémů bylo zvoleno na základě konzultace s vedoucím diplomové práce. Pro výrobu testovacích vzorků byly zvoleny systémy o čtyřech vrstvách uhlíkové tkaniny se stejnou skladbou uhlíkové výztuže.

5.1 Výztuž

Jako výztuž byla zvolena uhlíková tkanina s plátnovou formou. Tato výztuž pokrývá velké množství produkce uhlíkových systémů. Má tedy širokou formu uplatnění a na trhu je dostupná ve velkém množství plošných hmotností. Pro výrobu vzorků byla zvolena tedy uhlíková tkanina s plátnovou vazbou o plošné hmotnosti 200g/m^2 . Počet vrstev výztuže pro naše vzorky byly zvoleny 4.

Tab. 5 – Parametry uhlíkové tkaniny

Velikost osnovy	500 n/m
Velikost úteku	500 n/m
Tloušťka	0,32 mm
Plošná hmotnost	200g/m^2



Obr. 16 – Plátnová uhlíková tkanina

5.2 Matrice

Pro výrobu zkušebních těles byly zvoleny dva druhy epoxidové pryskyřice. Tyto druhy jsou vhodné pro ruční laminování a mají rozdílné vlastnosti, díky čemuž můžeme pozorovat rozdílné termomechanické vlastnosti při zkouškách. Ke každé pryskyřici byl zvolen typ tužidla doporučený výrobcem.

5.2.1 Epoxidová pryskyřice L-285

Jedná se o velmi kvalitní pryskyřici určenou pro letecký průmysl a pro výrobu modelů. Pryskyřice s tužidlem vytváří velmi viskózní směs a díky tomu jsou vlákna rychle a kvalitně prosycena. Díky tomu má výrobek podstatně nižší hmotnost a vyšší užitkovou hodnotu. Doporučené tužidlo dle výrobce s touto pryskyřicí je mimo jiné námi zvolené 285 s poměrem míchání 100:40 váhově. Doporučená doba zpracovatelnosti činí při 100g/25°C cca 50 min.

Tab. 6 – Specifikace pryskyřice L-285

Hustota	1,18-1,23 g/cm ³
Viskozita	600-900 m Pa.s.
Hodnota epoxidu	0,59-0,65

5.2.2 Tužidlo 285

Tužidlo bylo zvoleno na základě dostupnosti a doporučení výrobce s poměrem míchání dle předchozí kapitoly. Aminové číslo udává množství hydroxidu draselného ekvivalentního amino skupinám v 1g vzorku.

Tab. 7 – Specifikace tužidla 285

Hustota	0,94-0,97 g/cm ³
Viskozita	50-100 m Pa.s.
Aminové číslo	480-550

5.2.3 Epoxidová pryskyřice LH-210

Tahle epoxidová pryskyřice byla vyvinuta jako extrémně čirá, bez toxinů a UV stabilní. Během vytvrzování nebyly naměřeny žádné škodlivé výpary a dokonce při běžném použití nevyvolává alergickou reakci pokožky. Tato pryskyřice patří mezi jedny z nejdražších. Vytvrzuje se již od +10°C. Doporučená doba zpracovatelnosti je cca 30 min. Poměr míchání je 100:45 váhově v kombinaci s tužidlem H 10.

Tab. 8 – Specifikace pryskyřice LH-210

Hustota	1,15-1,23 g/cm ³
Viskozita	700-900 m Pa.s.
Hodnota epoxidu	0,55-0,60

5.2.4 Tužidlo H-10

Tužidlo bylo zvoleno dle technického listu jako jediné možné s pryskyřicí LH 210 s poměrem míchání dle předchozí kapitoly. Aminové číslo udává množství hydroxidu draselného ekvivalentního amino skupinám v 1g vzorku.

Tab. 9 – Specifikace tužidla H-10

Hustota	0,98-1,04 g/cm ³
Viskozita	50-150 m Pa.s.
Aminové číslo	250-350

6 VÝROBA KOMPOZITNÍCH SYSTÉMŮ

Pro testování termomechanického zatížení uhlíkových kompozitů byla nutná výroba testovacích kompozitních systémů. Byla zvolena skladba dvou podobných systémů, které se liší pouze použitou matricí. Kompozitní systémy byly tedy vyrobeny z výztuže o 4 vrstvách uhlíkové tkaniny o plošné hmotnosti 200g/m², se stejnou orientací této tkaniny ale s jinou formou matrice (pryskyřice s tužidlem). Podmínky výroby byly stanoveny ručním laminováním za pokojové teploty 23°C. Doba vytvrzení a následného odformování byla 48 hodin.

6.1 Výroba systémů ručním laminováním

V Obou případech kompozitních systémů byla použita metoda ručního laminování, která začíná důkladnou přípravou podložky. Podložka v těchto případech byla skleněná deska. Desku bylo nutné pořádně očistit a následně nanést separační vosk pro lepší odformování. Tento separátor bylo nutné důkladně vyleštit. Proces nanášení separačního vosku se na každé skleněné desce opakoval 3x. V našem případě byl použit separační vosk Oskar's M – 700/C-WAX.

Tab. 10 – Specifikace separačního vosku M-700/C

Měrná hmotnost	0,88 g/ml při 20°C
Bod vzplanutí	Více než 65°C
Teplota vznícení	300°C
Meze výbušnosti	0,6-6,5 % objemu



Obr. 17 – Voskem ošetřená čistá skleněná deska

Dalším krokem při výrobě kompozitních systémů bylo navázení uhlíkové tkaniny. Dle hmotnosti této tkaniny bylo potřeba si namíchat matrici skládající se z pryskyřice a tužidla v daném poměru. Pro ruční laminaci je vhodné si připravit minimálně 1,2 násobek množství matrice ke tkanině.

Tab. 11 – Vstupní hmotnosti materiálů pro systém L-285

Kompozitní systém L-285	
Poměr míchání (pryskyřice:tužidlo)	100:40
Hmotnost tkaniny	243 g
Celková hmotnost matrice	350 g
Hmotnost pryskyřice	250 g
Hmotnost tužidla	100 g

Tab. 12 - Vstupní hmotnosti materiálů pro systém LH-210

Kompozitní systém LH-210	
Poměr míchání (pryskyřice:tužidlo)	100:45
Hmotnost tkaniny	232 g
Celková hmotnost matrice	350 g
Hmotnost pryskyřice	240 g
Hmotnost tužidla	110 g

Po důkladném promíchání pryskyřice s tužidlem byly směsi připraveny k laminaci.



Obr. 18 – Navážená a nastříhaná uhliková tkanina

Prvním krokem samotné ruční laminace bylo nanesení matrice pomocí malého malířského válečku na skleněnou desku ošetřenou separačním voskem. Po rovnoměrném nanesení matrice došlo k položení první vrstvy tkaniny. Tato vrstva tkaniny byla opět prosycena matricí, ovšem pomocí rýhovaného válečku pro lepší prosycení a zamezení tvorby vzduchových kapes. Následně došlo k rovnoměrnému nanesení matrice a položení další vrstvy tkaniny. Tento proces syčení matricí pomocí rýhovaného válečku se opakoval u všech čtyřech vrstev.

Po dosycení se přebytečná matrice zvažila, abychom zjistili přebytek a věděli přesný hmotnostní podíl, který byl použit. U prvního systému s pryskyřicí L-285 to bylo 50g a u druhého systému s pryskyřicí LH-210 to bylo 60g. Následně došlo k vytvrzení obou kompozitních systémů za laboratorní teploty 23°C po dobu 48 hodin. Po dosažení této doby došlo k odformování laminátu ze skleněné podložky. Díky separačnímu vosku vše proběhlo bez nějakých deformací laminátu.

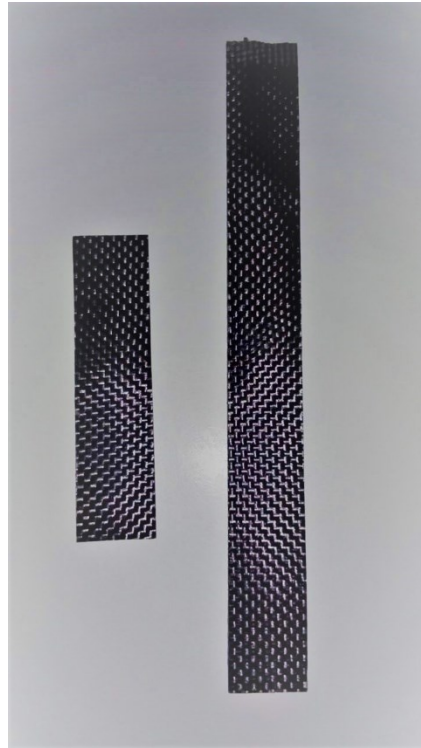


Obr. 19 – Prosycené vrstvy uhlíkové tkaniny s matricí

Pro celý proces ruční laminace nám postačily pomůcky z laboratoře Univerzity Tomáše Bati. Pomůcky, které byly použity jsou: skleněné desky, malá kuchyňská váha, kelímky a dřevěné kolíčky pro míchání matrice, nůžky, malý malířský váleček, rýhovaný váleček, gumové rukavice

6.2 Výroba zkušebních těles dle technických norem pro dané zkoušky

Pro to aby mohly být provedeny termomechanické zkoušky, bylo nutné připravit testovací vzorky. Abychom vzorky nařezali na správnou velikost, bylo nutné prostudovat normy pro dané zkoušky. Dle normy pro stanovení ohybových vlastností dle ČSN EN ISO 14 125, byla zvolena velikost zkušební vzorku o šíři 25mm a výšce 100mm. Pro stanovení tahuových vlastností byla použita norma ČSN EN ISO 527-4, kde byla zvolena velikost zkušební vzorku o šíři 25mm a výšce 250mm.



Obr. 20 – Velikost testovacích vzorků (levý-ohyb-25x100mm, pravý-tah-25x250mm)

Pro získání požadovaných vzorků byla použita kotoučová řezací pila v dílnách Univerzity Tomáše Bati, o tloušťce kotouče 3mm. Z obou desek bylo potřeba vyřezat stejný počet kusů vzorků jak pro zkoušky na stanovení ohybových vlastností, tak pro stanovení tahových vlastností. Po rozkreslení a rozpočítání vzorků na desku bylo dosaženo 18kusů vzorků pro zkoušky ohybem a 18 kusů vzorků pro zkoušky tahové z každé desky. Řezání bylo prováděno za intenzivního odsávání a v ochranném obleku s rouškou kvůli zvýšené prašnosti způsobené řezáním uhlíkového kompozitního systému.

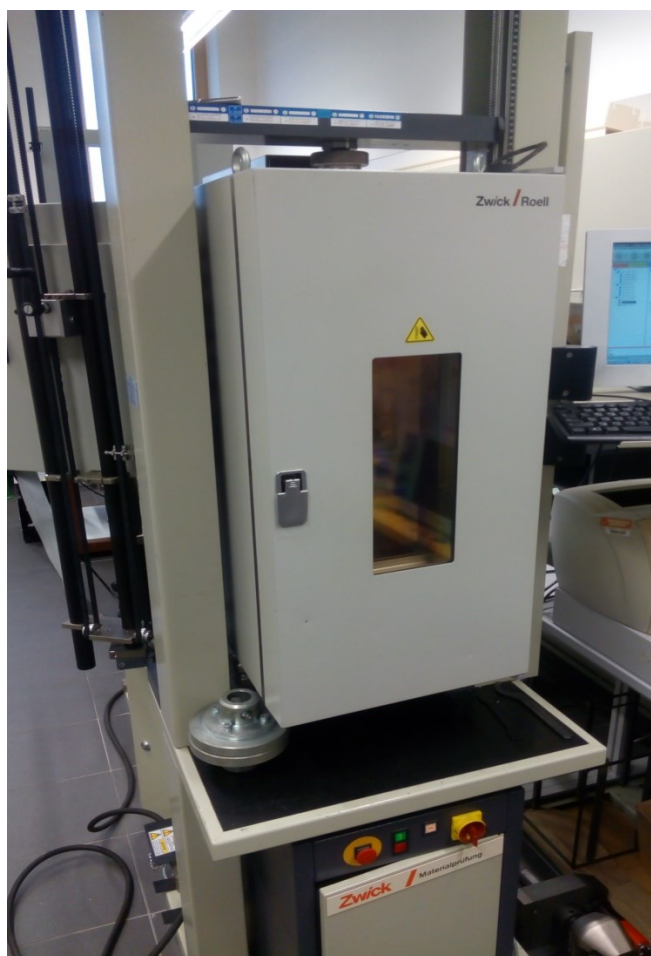
6.3 Teplotní vytvrzení zkušebních vzorků po dobu 14ti dnů

Proto, aby bylo dosaženo široké teplotní škály pro testování vzorků a aby bylo demonstrováno dlouhodobé teplotní zatížení zkušebních těles, byla polovina vzorků umístěna do teplotní pece po dobu 14ti dnů a to na 60°C. Vždy se tedy jednalo o 9 kusů vzorků pro zkoušku ohybem a 9 kusů vzorků pro zkoušku tahem od každého kompozitního systému. Pec byla použita v laboratořích Univerzity Tomáše Bati.

7 POUŽITÁ TESTOVACÍ ZAŘÍZENÍ

7.1 Univerzální zkušební zařízení ZWICK 1456

Zkoušky ohybem i tahem byly prováděny na tomto stroji. Jedná se o univerzální zkušební stroj vyráběný německou firmou Zwick. Jedná se o stroj z řady ProLine pro standartní zkoušky materiálu. Stroj se skládá z pevného a tuhého rámu. Pohyblivý příčník je veden ve dvou ocelových sloupcích. Spodní rám je nepohyblivý. Na tomto stroji lze nastavit velmi malé rychlosti s vysokou stabilitou. Dále je stroj vybaven vysokorychlostním zpětným chodem a výměnným typem upínacích čelistí, což je zapotřebí pro různé typy zkoušek. Výměna čelistí je snadná a rychlá. Zařízení je dále vybaveno bezúdržbovým AC pohonem a teplotní komorou pro testování za vysokých teplot. Lze jej obsluhovat pomocí běžného stolního počítače či notebooku a data jsou zaznamenávána pomocí programu TestExpert II.



Obr. 21 – ZWICK 1456 včetně teplotní komory

Tab. 13 – Technické parametry stroje ZWICK 1456

Minimální zkušební síla	2,5 N
Maximální zkušební síla	20 kN
Maximální posuv příčnicku	800 mm/min
Šířka pracovního prostoru	420 mm
Výška pracovního prostoru	1050 mm
Hmotnost	150 kg
Teplotní rozsah komory	Od -80°C do +250°C

7.2 Trouba Fagor 6H

Pro vytvrzení vzorků po dobu 14ti dnů byla použita vestavná trouba značky Fagor, umístěná v laboratořích Univerzity Tomáše Bati. Trouba je z řady 6H-175X. Trouba byla umístěna v kovovém rámu ve výšce od země 120cm pro lepší manipulaci a obsluhu.



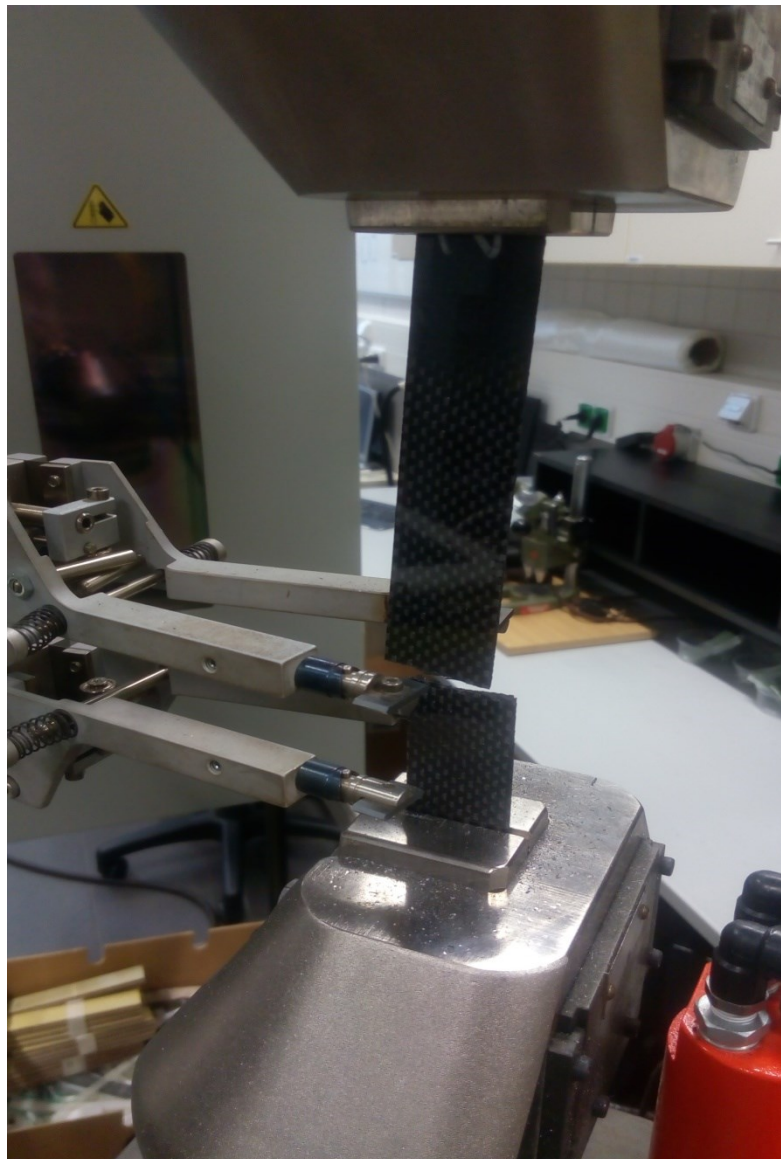
Obr. 22 – Vestavná trouba Fagor 6H-175X

Tab. 14 – Technické parametry vestavné trouby Fagor

Maximální příkon	2,2 kW
Spotřeba energie	0,79 kW
Rozmezí teplot	50 °C - 275 °C
Šířka zařízení	592 mm
Výška zařízení	595 mm
Hloubka zařízení	552 mm
Hmotnost	34 kg

8 ZKOUŠKA PRO STANOVENÍ TAHOVÝCH VLASTNOSTÍ

Tahová zkouška byla prováděna na univerzálním stroji ZWICK 1456, který byl vybaven pneumatickými čelistmi pro upínání vzorků zatížené tahem nebo tlakem. Zkoušky byly prováděny v laboratořích Univerzity Tomáše Bati. Všechny zkušební tělesa zatížené tahem byly testovány dle normy ČSN EN ISO 527-4. Tahová zkouška byla provedena pouze za laboratorní teploty 22,5 °C z důvodů nemožnosti testovat vzorky v teplotní komoře pro nedostatek místa a možnosti deformace pneumatických čelistí. Všechny zkoušky byly vyhodnoceny za pomoci programu TestExpert II. Vzorky byly důkladně změřeny z důvodu nepřesného řezání na kotoučové pile a pro získání přesnějších výsledků.



Obr. 23 – Příklad prasknutí testovacího vzorku zatíženého tahem

Z naměřených zkoušek, které byly zaznamenány programem TestExpert II bylo vybráno jen několik potřebných dat vhodných ke zpracování. Pro zkoušky tahové se jedná o modul pružnosti v tahu E (MPa), mez pevnosti v tahu σ_t (MPa), maximální práce při přetržení W (Nmm), poměrné prodloužení při přetržení ε (%), maximální síla při přetržení F (N) a rozměry každého testovaného vzorku závislé na šířce b (mm) a tloušťce t (mm).

8.1 Naměřené hodnoty pro vzorky s matricí L-285

Pro vzorky s matricí obsahující pryskyřici L-285 a tužidlo 285 byla naměřena předpokládaná tloušťka 1,13 mm. Pro dané měření byl nastaven posuv 200 mm/min se startovní vzdáleností kleštin 150 mm.

8.1.1 Vzorky při pokojové teplotě 22,5°C

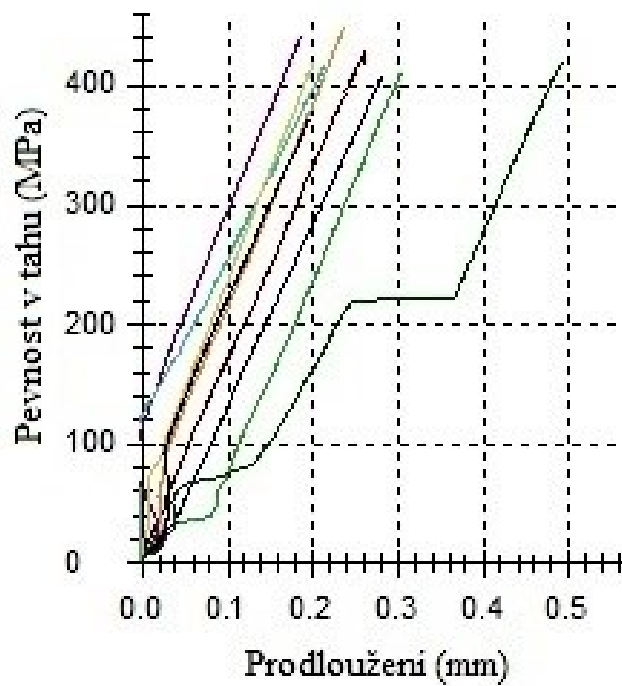
Jedná se o vytvrzené vzorky při laboratorní teplotě 22,5°C a stejné teplotě testování.

Tab. 15 – Tahová zkouška vzorků s matricí L-285 při teplotě 22,5 °C

Vzorek	E [MPa]	σ_t [MPa]	W [Nmm]	ε [%]	F [N]	b [mm]	t [mm]
1	53100	427	1596,39	2,8	11700	25	1,12
2	46800	411	1468,43	2,7	11500	25	1,12
3	41000	408	1547,78	2,8	11400	25,1	1,13
4	49900	449	1600,34	3	12600	25,2	1,12
5	51500	443	1468,88	2,9	12400	25	1,11
6	43000	417	1602,13	2,9	11500	25	1,13
7	56500	420	1316,98	2,8	11800	25	1,12
8	46300	371	1125,27	2,5	10400	25,2	1,12
9	44300	421	2584,82	2,8	11800	25,2	1,11

Tab. 16 – Průměrné hodnoty tahové zkoušky vzorků s matricí L-285 při teplotě 22,5 °C

	E [MPa]	σ_t [MPa]	W [Nmm]	ε [%]	F [N]	b [mm]	t [mm]
\bar{x}	48000	419	1590,11	2,8	11700	25	1,12
s	5080	22,4	404,93	0,1	622	0	0
v	10,57	5,34	25,47	4,98	5,32	0	0



Obr. 24 – Graf závislosti meze pevnosti v tahu na prodloužení u vzorků s matricí L-285 při teplotě 22,5 °C

8.1.2 Vzorky při pokojové teplotě 22,5 °C s předchozím vytvrzením 60 °C

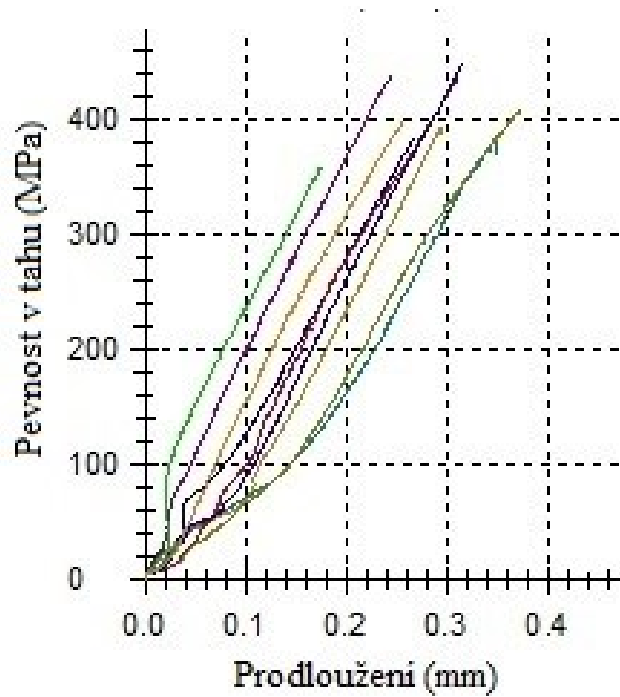
Zde jsou uvedeny výsledky vzorků, které byly po vytvrzení při teplotě 22,5 °C vloženy na 14 dní do pece na 60 °C a poté opět ochlazeny na laboratorní teplotu 22,5 °C.

Tab. 17 - Tahová zkouška vzorků s matricí L-285 při teplotě 22,5 °C s předchozím vytvrzením 60 °C

Vzorek	E [MPa]	σ_t [MPa]	W [Nmm]	ε [%]	F [N]	b [mm]	t [mm]
1	43700	383	1363,93	2,7	10700	25,1	1,12
2	49000	393	1359,51	2,7	10800	25	1,13
3	48500	440	1610,39	3,1	12300	24,9	1,13
4	48400	384	1562,22	2,7	10300	25	1,13
5	45800	409	1846,92	2,9	11300	24,9	1,12
6	40100	435	1748,74	3	12200	25,2	1,12
7	49000	359	997,45	2,5	9960	25,1	1,11
8	51900	449	1751,8	3	12600	25	1,1
9	53100	398	1417,51	2,8	11200	24,9	1,12

Tab. 18 - Průměrné hodnoty tahové zkoušky vzorků s matricí L-285 při teplotě 22,5 °C s předchozím vytvrzením 60 °C

	E [MPa]	σ_t [MPa]	W [Nmm]	ε [%]	F [N]	b [mm]	t [mm]
\bar{x}	47700	406	1517,61	2,8	11300	25	1,12
s	4000	30,1	263,75	0,2	924	0	0
v	8,39	7,43	17,38	6,58	8,21	0	0



Obr. 25 - Graf závislosti meze pevnosti v tahu na prodloužení u vzorků s matricí L-285 při teplotě 22,5 °C s přechozím vytvrzením 60 °C

8.2 Naměřené hodnoty pro vzorky s matricí LH-210

Pro vzorky s matricí obsahující pryskyřici LH-210 a tužidlo H-10 byla naměřena předpokládaná tloušťka 1,31 mm. Pro dané měření byl nastaven posuv 200 mm/min se startovní vzdáleností kleštin 150 mm.

8.2.1 Vzorky při pokojové teplotě 22,5°C

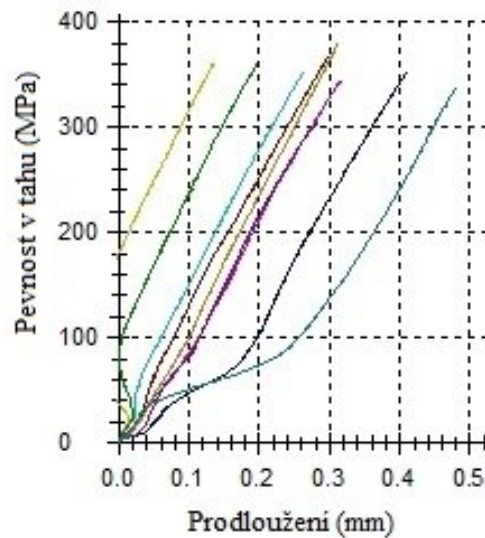
Jedná se o vytvrzené vzorky při laboratorní teplotě 22,5°C a stejné teplotě testování.

Tab. 19 - Tahová zkouška vzorků s matricí LH-210 při teplotě 22,5 °C

Vzorek	E [MPa]	σ_t [MPa]	W [Nmm]	ε [%]	F [N]	b [mm]	t [mm]
1	38300	345	1690,9	2,9	11300	25	1,31
2	39900	352	1616,98	3,1	11500	25	1,3
3	40000	361	1356,97	3,1	11800	25,1	1,31
4	36300	368	1834,31	3,1	12000	25,2	1,3
5	40500	362	1489,17	3,1	11900	25,1	1,32
6	38000	354	1925,73	3	11600	25	1,31
7	38700	380	1835,41	3,2	12400	25	1,31
8	30800	304	1316,52	2,8	9970	25,2	1,3
9	31400	338	2007,97	2,9	11100	25	1,31

Tab. 20 - Průměrné hodnoty tahové zkoušky vzorků s matricí LH-210 při teplotě 22,5 °C

	E [MPa]	σ_t [MPa]	W [Nmm]	ε [%]	F [N]	b [mm]	t [mm]
\bar{x}	37100	352	1674,88	3	11500	25	1,31
s	3620	21,6	248,15	0,1	708	0	0
v	9,75	6,15	14,82	4,49	6,15	0	0



Obr. 26 - Graf závislosti meze pevnosti v tahu na prodloužení u vzorků s matricí LH-210 při teplotě 22,5 °C

8.2.2 Vzorky při pokojové teplotě 22,5°C s předchozím vytvrzením 60°C

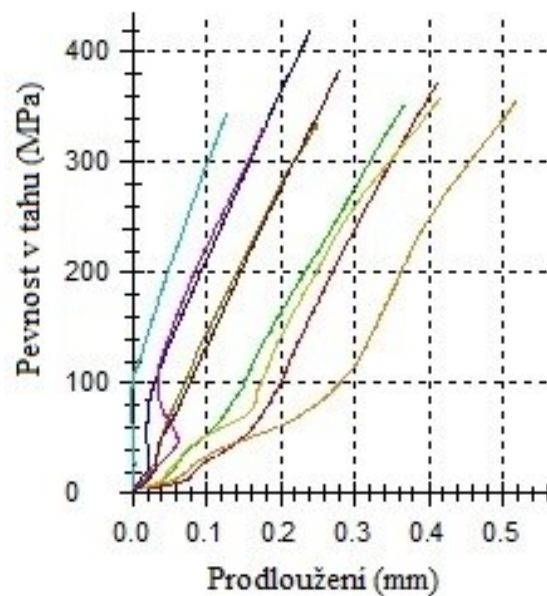
Zde jsou uvedeny výsledky vzorků, které byly po vytvrzení při teplotě 22,5°C vloženy na 14 dní do pece na 60°C a poté opět ochlazeny na laboratorní teplotu 22,5°C.

Tab. 21 - Tahová zkouška vzorků s matricí LH-210 při teplotě 22,5 °C s předchozím vytvrzením 60 °C

Vzorek	E [MPa]	σ_t [MPa]	W [Nmm]	ε [%]	F [N]	b [mm]	t [mm]
1	40400	337	1405,07	2,9	10700	24,9	1,31
2	41000	373	1922,58	3,1	12100	24,9	1,32
3	33600	352	1831,75	2,9	11500	25	1,32
4	44900	419	1858,36	3,4	13700	25	1,31
5	31400	358	2277,1	3	11700	25,1	1,31
6	41700	334	1065,45	2,8	10900	25	1,3
7	59400	345	955,26	2,9	11200	25	1,31
8	25200	361	2216,57	3	11800	25,2	1,3
9	46400	385	1740,59	3,2	12600	25,1	1,32

Tab. 22 - Průměrné hodnoty tahové zkoušky vzorků s matricí LH-210 při teplotě 22,5 °C s přechozím vytvrzením 60 °C

	E [MPa]	σ_t [MPa]	W [Nmm]	ε [%]	F [N]	b [mm]	t [mm]
\bar{x}	40400	363	1696,97	3	11800	25	1,31
s	9850	26,9	466,06	0,2	917	0	0
v	24,35	7,41	27,46	6,55	7,75	0	0



Obr. 27 - Graf závislosti meze pevnosti v tahu na prodloužení u vzorků s matricí LH-210 při teplotě 22,5 °C s předchozím vytvrzením 60 °C

9 ZKOUŠKA PRO STANOVENÍ OHYBOVÝCH VLASTNOSTÍ

Zkouška ohybem byla prováděna na univerzálním stroji ZWICK 1456, který byl vybaven místo pneumatických kleštin pro tah a tlak, kleštinami pro měření ohybu. Jednalo se o spodní tuhé podpěry se dvěma podpěrnými body, na kterých se dala měnit vzdálenost podpěrných bodů a vrchní pohyblivé části s deskou. Zkoušky byly prováděny v laboratořích Univerzity Tomáše Bati. Všechna zkušební tělesa zatížená ohybem byly testovány dle normy ČSN EN ISO 14125. Zkouška byla provedena za laboratorní teploty 22,5 °C a také v teplotní komoře za teploty 80°C. Všechny zkoušky byly vyhodnoceny za pomoci programu TestExpert II. Vzorky byly důkladně změřeny z důvodu nepřesného řezání na kotoučové pile a pro získání přesnějších výsledků.



Obr. 28 – Příklad testování třibodovým ohybem v teplotní komoře

Z naměřených zkoušek, které byly zaznamenány programem TestExpert II bylo vybráno jen několik potřebných dat vhodných ke zpracování. Pro zkoušky tříbodovým ohybem se jedná o modul pružnosti v ohybu E (MPa), mez pevnosti v ohybu σ_t (MPa), maximální práce při maximálním zatížení W (Nmm) a rozměry každého testovaného vzorku závislé na šířce b (mm) a tloušťce t (mm).

9.1 Naměřené hodnoty pro vzorky s matricí L-285

Pro vzorky s matricí obsahující pryskyřici L-285 a tužidlo 285 byla naměřena předpokládaná tloušťka 1,13 mm. Pro dané měření byl nastaven posuv 10 mm/min. Kleštiny byly do startovací polohy nastaveny ručně asi na 3 mm od sebe, aby došlo k co nejkratšímu možnému času měření. Spodní kleštiny byly nastaveny na vzdálenost 55 mm. Po konzultaci s Ing. Žaludkem, byla vzdálenost spodních kleštin pro testování při teplotě 80 °C nastavena na 40 mm z důvodu předpokladu velkých průhybů.

9.1.1 Vzorky při pokojové teplotě 22,5 °C

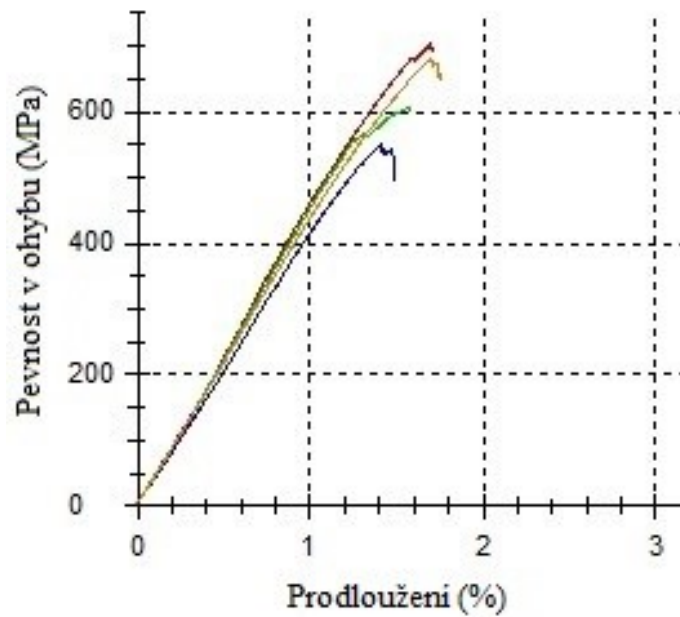
Jedná se o vytvrzené vzorky při laboratorní teplotě 22,5 °C a stejné teplotě testování.

Tab. 23 - Ohybová zkouška vzorků s matricí L-285 při teplotě 22,5 °C

Vzorek	E [MPa]	σ_t [MPa]	W [Nmm]	b [mm]	t [mm]
1	42700	705	1113,17	25,2	1,14
2	41800	607	926,41	25,1	1,13
3	39100	551	699,63	25	1,12
4	42300	681	1056,94	25,2	1,13

Tab. 24 - Průměrné hodnoty ohybové zkoušky vzorků s matricí L-285 při teplotě 22,5 °C

	E [MPa]	σ_t [MPa]	W [Nmm]	b [mm]	t [mm]
\bar{x}	41500	636	949,04	25	1,13
s	1600	70,5	183,76	0	0
v	3,86	11,08	19,36	0	0



Obr. 29 - Graf závislosti meze pevnosti v ohybu na prodloužení u vzorků s matricí L-285 při teplotě 22,5 °C

9.1.2 Vzorky při pokojové teplotě 22,5 °C s předchozím vytvrzením 60 °C

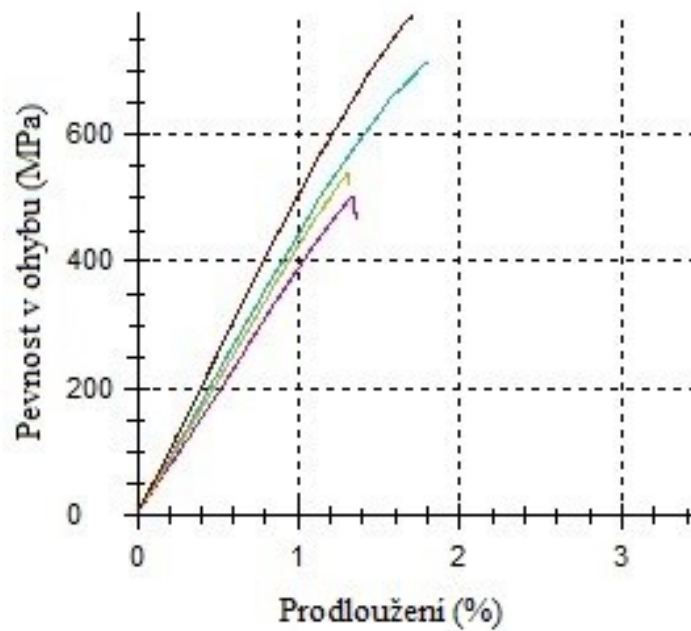
Zde jsou uvedeny výsledky vzorků, které byly po vytvrzení při teplotě 22,5 °C vloženy na 14 dní do pece na 60 °C a poté opět ochlazeny na laboratorní teplotu 22,5 °C.

Tab. 25 - Ohybová zkouška vzorků s matricí L-285 při teplotě 22,5 °C s předchozím vytvrzením 60 °C

Vzorek	E [MPa]	σ_t [MPa]	W [Nmm]	b [mm]	t [mm]
1	37200	503	593,65	25	1,12
2	43000	712	1187,44	25	1,13
3	41100	540	623,18	25,1	1,14
4	48600	788	1248,09	25,1	1,13

Tab. 26 - Průměrné hodnoty ohybové zkoušky vzorků s matricí L-285 při teplotě 22,5 °C s předchozím vytvrzením 60 °C

	E [MPa]	σ_t [MPa]	W [Nmm]	b [mm]	t [mm]
\bar{x}	42500	635	913,09	25	1,13
s	4750	137	352,88	0	0
v	11,19	21,48	38,65	0	0



Obr. 30 - Graf závislosti meze pevnosti v ohybu na prodloužení u vzorků s matricí L-285 při teplotě 22,5 °C s předchozím vytvrzením 60 °C

9.1.3 Vzorky při teplotě 80 °C

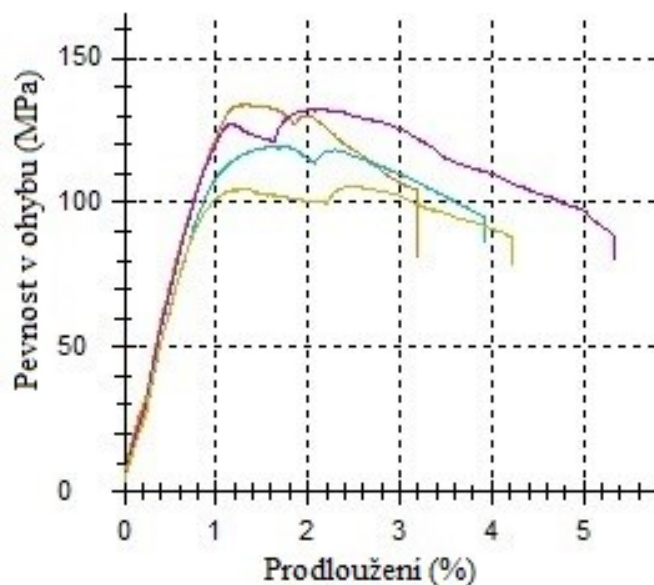
Jedná se o výsledky vzorků, které byly vytvrzeny při laboratorní teplotě 22,5 °C a následně vloženy do teplotní komory po dobu 20 min na 80 °C. Za této teploty pak došlo ke zkouškám.

Tab. 27 - Ohybová zkouška vzorků s matricí L-285 při teplotě 80 °C s předchozím vytvrzením 22,5 °C

Vzorek	E [MPa]	σ_t [Mpa]	W [Nmm]	b [mm]	t [mm]
1	9990	134	139	25	1,13
2	9930	133	242,25	25,2	1,13
3	9320	120	161,48	25,1	1,12
4	9560	106	262,76	25	1,12

Tab. 28 - Průměrné hodnoty ohybové zkoušky vzorků s matricí L-285 při teplotě 80 °C s předchozím vytvrzením 22,5 °C

	E [MPa]	σ_t [MPa]	W [Nmm]	b [mm]	t [mm]
\bar{x}	9700	123	201,37	25	1,13
s	316	13,2	60,34	0	0
v	3,26	10,7	29,96	0	0



Obr. 31 - Graf závislosti meze pevnosti v ohybu na prodloužení u vzorků s matricí L-285 při teplotě 80 °C s předchozím vytvrzením 22,5 °C

9.1.4 Vzorky s předchozím vytvrzením 60 °C při teplotě 80 °C

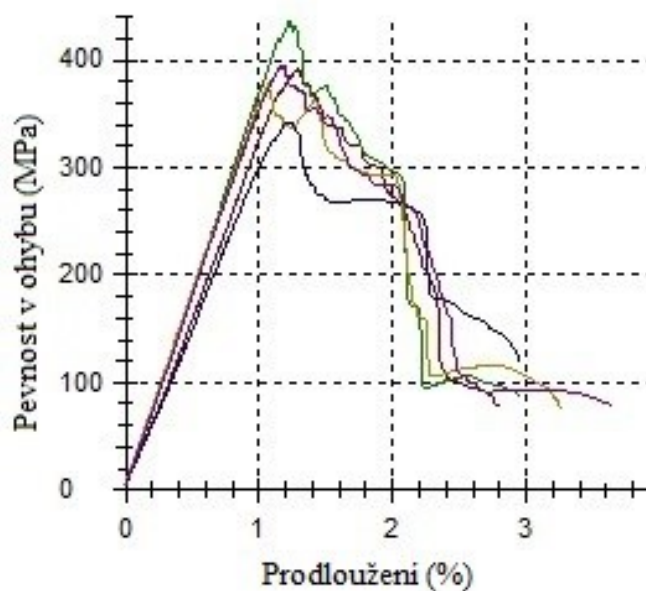
Zde jsou uvedeny výsledky vzorků, které byly po vytvrzení při teplotě 22,5 °C vloženy na 14 dní do pece na 60 °C a poté opět ochlazeny na laboratorní teplotu 22,5 °C. K poslední teplotní změně došlo před samotnou zkouškou a to vložení do teplotní komory po dobu 20 min na 80 °C. Za této teploty pak došlo ke zkouškám.

Tab. 29 - Ohybová zkouška vzorků s matricí L-285 při teplotě 80 °C s předchozím vytvrzením 60 °C

Vzorek	E [MPa]	σ_t [MPa]	W [Nmm]	b [mm]	t [mm]
1	27800	393	332,01	25,1	1,13
2	33400	436	347,36	25,1	1,14
3	34300	378	262,91	25,2	1,13
4	34100	395	300,38	25	1,14

Tab. 30 - Průměrné hodnoty ohybové zkoušky vzorků s matricí L-285 při teplotě 80 °C s předchozím vytvrzením 60 °C

	E [MPa]	σ_t [MPa]	W [Nmm]	b [mm]	t [mm]
\bar{x}	31400	389	307,03	25	1,13
s	3550	33,8	33,37	0	0
v	11,31	8,69	10,87	0	0



Obr. 32 - Graf závislosti meze pevnosti v ohybu na prodloužení u vzorků s matricí L-285 při teplotě 80 °C s předchozím vytvrzením 60 °C

9.2 Naměřené hodnoty pro vzorky s matricí LH-210

Pro vzorky s matricí obsahující pryskyřici LH-210 a tužidlo H-10 byla naměřena předpokládaná tloušťka 1,31 mm. Pro dané měření byl nastaven posuv 10 mm/min. Kleštiny byly do startovací polohy nastaveny ručně asi na 3 mm od sebe, aby došlo k co nejkratšímu možnému času měření. Spodní kleštiny byly nastaveny na vzdálenost 55 mm. Po konzultaci s Ing. Žaludkem, byla vzdálenost spodních kleštin pro testování při teplotě 80 °C nastavena na 40 mm z důvodu předpokladu velkých průhybů.

9.2.1 Vzorky při pokojové teplotě 22,5 °C

Jedná se o vytvrzené vzorky při laboratorní teplotě 22,5 °C a stejné teplotě testování.

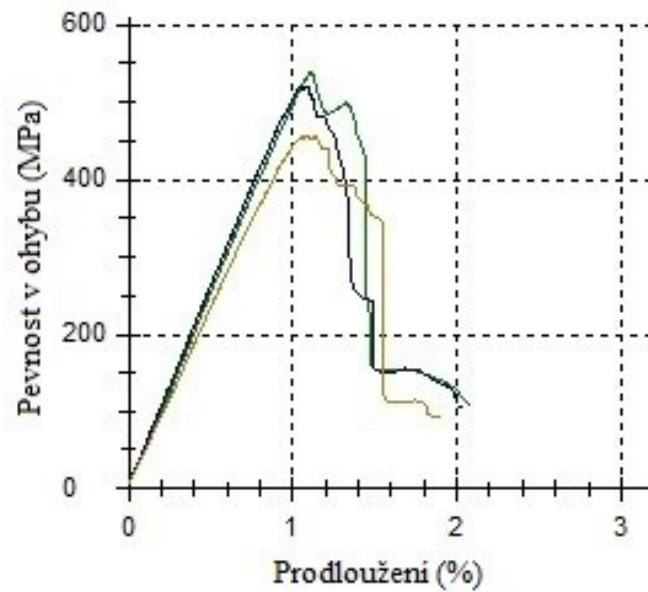
Tab. 31 - Ohybová zkouška vzorků s matricí LH-210 při teplotě 22,5 °C

Vzorek	E [MPa]	σ_t [MPa]	W [Nmm]	b [mm]	t [mm]
1	47500	541	533,47	25	1,31
2	51200	521	486,18	24,9	1,3
3	44300	456	467,21	25,2	1,31
4	26500	353	534,44	25	1,32

V této tabulce lze vidět, že poslední měřená hodnota se znatelně liší od ostatních naměřených vzorků. Velkou pravděpodobností takovéto odchylky je deformace na zkušebním vzorku. Tahle hodnota proto nebyla v průměrných hodnotách započítána a proto se také neobjevuje ve výsledném grafu.

Tab. 32 - Průměrné hodnoty ohybové zkoušky vzorků s matricí LH-210 při teplotě 22,5 °C

	E [MPa]	σ_t [MPa]	W [Nmm]	b [mm]	t [mm]
\bar{x}	47700	506	495,62	25	1,31
S	3450	44,1	34,12	0	0
V	7,24	8,71	6,89	0	0



Obr. 33 - Graf závislosti meze pevnosti v ohybu na prodloužení u vzorků s matricí LH-210 při teplotě 22,5 °C

9.2.2 Vzorky při pokojové teplotě 22,5 °C s předchozím vytvrzením 60 °C

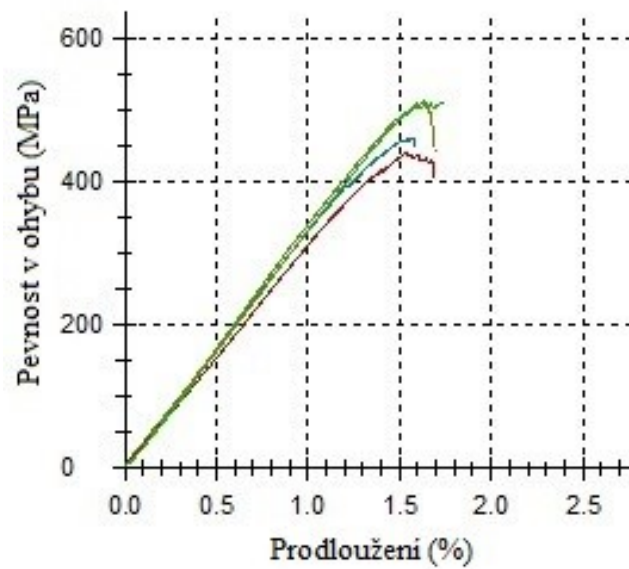
Zde jsou uvedeny výsledky vzorků, které byly po vytvrzení při teplotě 22,5 °C vloženy na 14 dní do pece na 60 °C a poté opět ochlazeny na laboratorní teplotu 22,5 °C.

Tab. 33 - Ohybová zkouška vzorků s matricí LH-210 při teplotě 22,5 °C s předchozím vytvrzením 60 °C

Vzorek	E [MPa]	σ_t [MPa]	W [Nmm]	b [mm]	t [mm]
1	31300	462	804,12	25,1	1,32
2	32000	513	894,29	25,1	1,31
3	29800	441	725,77	25	1,29
4	31900	514	980,97	24,9	1,3

Tab. 34 - Průměrné hodnoty ohybové zkoušky vzorků s matricí LH-210 při teplotě 22,5 °C s předchozím vytvrzením 60 °C

	E [MPa]	σ_t [MPa]	W [Nmm]	b [mm]	t [mm]
\bar{x}	31200	482	851,29	25	1,31
s	1030	36,9	110,53	0	0
v	3,29	7,64	12,98	0	0



Obr. 34 - Graf závislosti meze pevnosti v ohybu na prodloužení u vzorků s matricí LH-210 při teplotě 22,5 °C s předchozím vytvrzením 60 °C

9.2.3 Vzorky při teplotě 80 °C

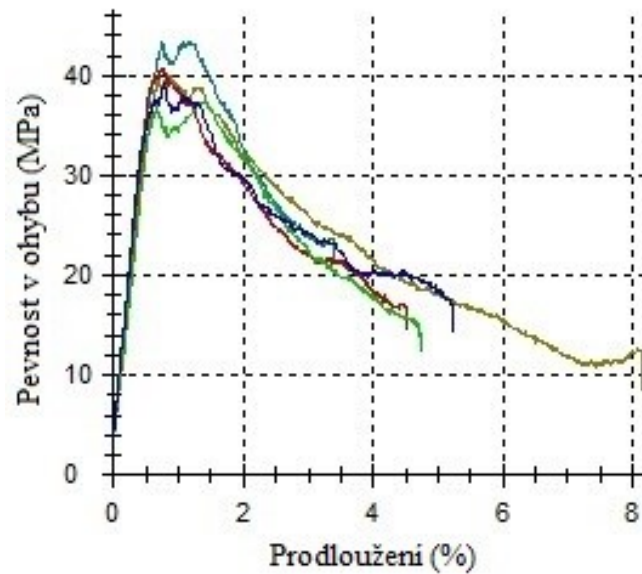
Jedná se o výsledky vzorků, které byly vytvrzeny při laboratorní teplotě 22,5 °C a následně vloženy do teplotní komory po dobu 20 min na 80 °C. Za této teploty pak došlo ke zkouškám.

Tab. 35 - Ohybová zkouška vzorků s matricí LH-210 při teplotě 80 °C s předchozím vytvrzením 22,5 °C

Vzorek	E [MPa]	σ_t [MPa]	W [Nmm]	b [mm]	t [mm]
1	6150	43,5	24,84	25	1,31
2	5790	39,9	27,82	25,2	1,3
3	6440	40,8	25,12	25,1	1,31
4	5870	37,4	52,78	25	1,32
5	7070	39,2	26,68	24,9	1,29

Tab. 36 - Průměrné hodnoty ohybové zkoušky vzorků s matricí LH-210 při teplotě 80 °C s předchozím vytvrzením 22,5 °C

	E [MPa]	σ_t [MPa]	W [Nmm]	b [mm]	t [mm]
\bar{x}	6270	40,2	31,45	25	1,31
s	516	2,26	11,99	0	0
v	8,23	5,62	38,12	0	0



Obr. 35 - Graf závislosti meze pevnosti v ohybu na prodloužení u vzorků s matricí LH-210 při teplotě 80 °C s předchozím vytvrzením 22,5 °C

9.2.4 Vzorky s předchozím vytvrzením 60 °C při teplotě 80 °C

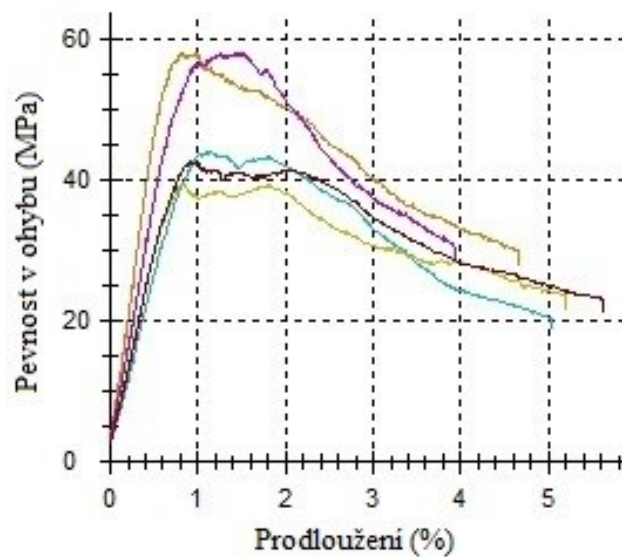
Zde jsou uvedeny výsledky vzorků, které byly po vytvrzení při teplotě 22,5 °C vloženy na 14 dní do pece na 60 °C a poté opět ochlazeny na laboratorní teplotu 22,5 °C. K poslední teplotní změně došlo před samotnou zkouškou a to vložení do teplotní komory po dobu 20 min na 80 °C. Za této teploty pak došlo ke zkouškám.

Tab. 37 - Ohybová zkouška vzorků s matricí LH-210 při teplotě 80 °C s předchozím vytvrzením 60 °C

Vzorek	E [MPa]	σ_t [MPa]	W [Nmm]	b [mm]	t [mm]
1	8880	58,2	48,11	25,1	1,3
2	6540	58,2	79,54	25	1,32
3	4620	44,1	45,56	25	1,31
4	5430	39,7	27,61	25,1	1,31
5	5330	42,7	33,36	24,9	1,3

Tab. 38 - Průměrné hodnoty ohybové zkoušky vzorků s matricí LH-210 při teplotě 80 °C s předchozím vytvrzením 60 °C

	E [MPa]	σ_t [MPa]	W [Nmm]	b [mm]	t [mm]
\bar{x}	6160	48,6	46,83	25	1,31
s	1670	8,91	20,15	0	0
v	27,08	18,35	43,02	0	0



Obr. 36 - Graf závislosti meze pevnosti v ohybu na prodloužení u vzorků s matricí LH-210 při teplotě 80 °C s předchozím vytvrzením 60 °C

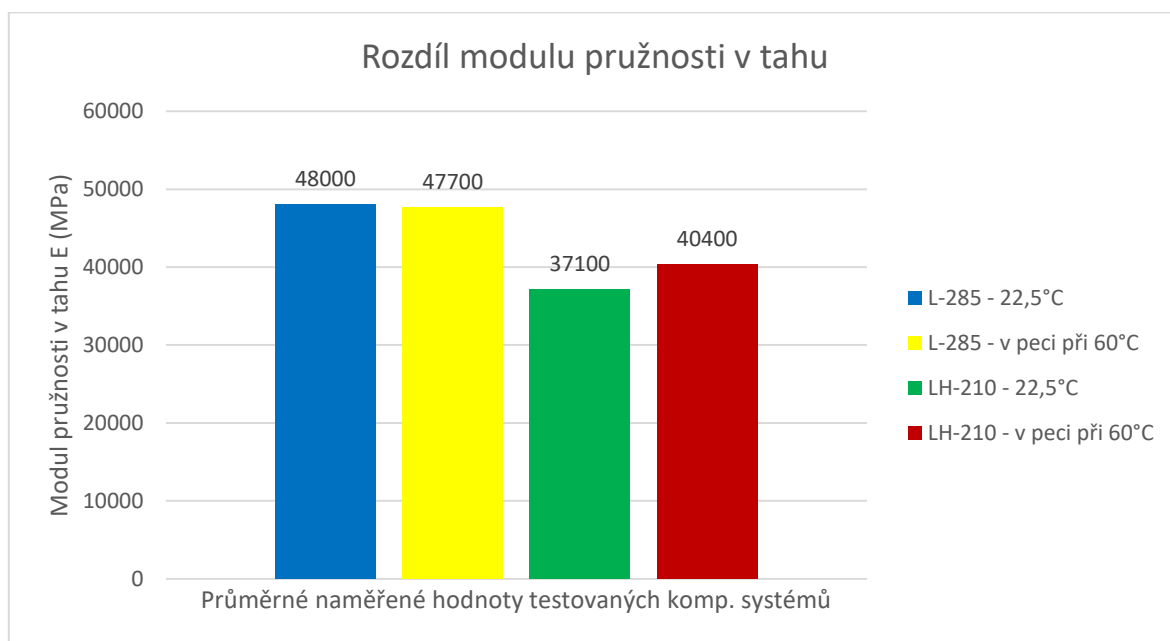
10 VYHODNOCENÍ EXPERIMENTÁLNÍCH VÝSLEDKŮ

V této kapitole práce jsou pomocí grafů shrnuty výsledky naměřených hodnot při zkoušce tahem a ohybem. Grafické porovnání bylo zvoleno z důvodů dobré přehlednosti a zpracovatelnosti. Pomocí této metody lze jednoduše vidět samotné rozdíly vlastností při prováděných termomechanických zkouškách a tím i vidět vliv teploty na danou strukturu kompozitního systému.

10.1 Porovnání tahových vlastností

V každém grafu jsou porovnány oba systémy za určitých podmínek a jsou vyhodnoceny výsledky, které mohou ovlivňovat použití těchto systémů v praxi.

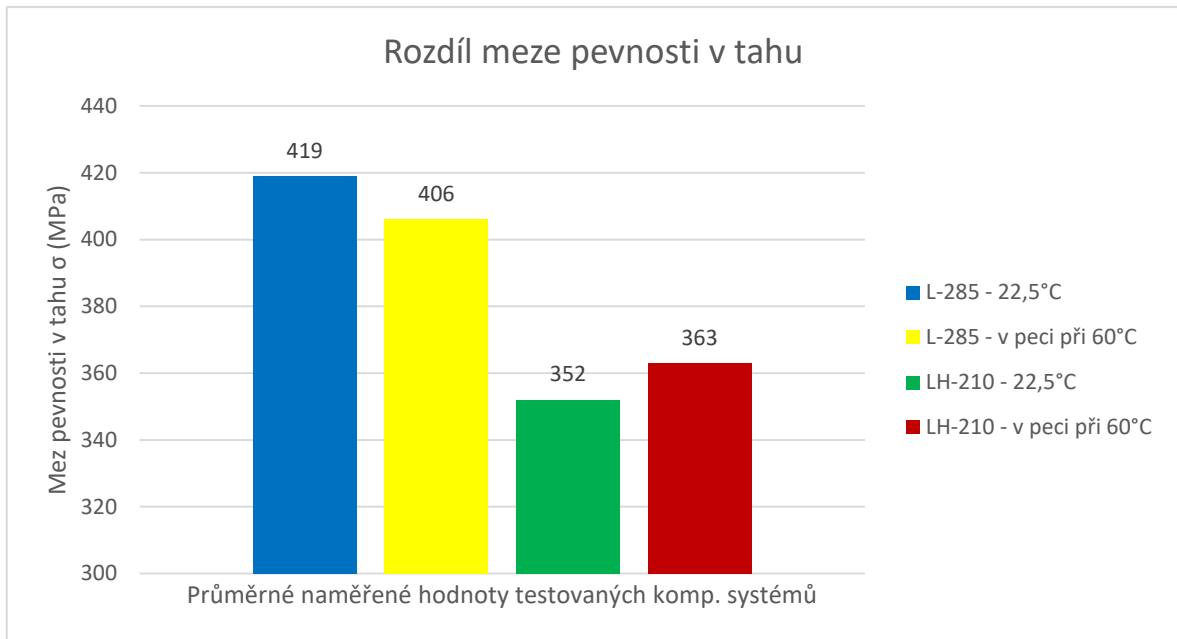
10.1.1 Modul pružnosti v tahu



Obr. 37 – Rozdíl modulu pružnosti v tahu

Z výsledků dosažených při zkoušce na tahové vlastnosti, lze vidět, že nejvyšší modul pružnosti v tahu má kompozitní systém s matricí L-285. V tomto systému i po vytvrzení v peci nedošlo ke skoro žádným změnám pro daný modul pružnosti. U systému s matricí LH-210 lze však pozorovat malý nárůst ve zvýšení modulu pružnosti v tahu po vytvrzení v peci. Tento nárůst o 3 300 MPa představuje 8 % z celkové hodnoty.

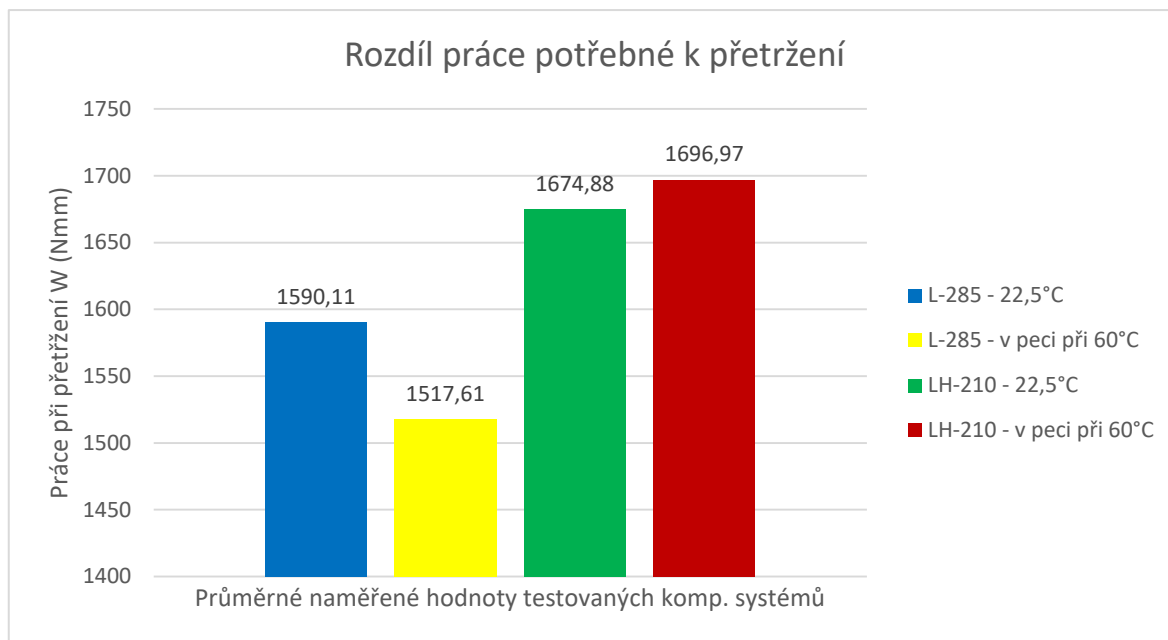
10.1.2 Mez pevnosti v tahu



Obr. 38 – Rozdíl meze pevnosti v tahu

Nejvyšší hodnotu pro mez pevnosti v tahu má systém s matricí L-285. Při vytvrzení v peci má tento systém sníženou mez o 13 MPa, což představuje ztrátu 3%. Znatelně nižší mez pevnosti pak má systém s matricí LH-210. U tohoto systému lze vidět, že po vytvrzení v peci došlo k menšímu nárůstu meze pevnosti o 11 MPa. Pro oba systémy tedy platí, že dlouhodobé vytvrzení v peci při 60°C po dobu 14ti dnů, nemělo nějak zásadní vliv na jejich mez pevnosti v tahu.

10.1.3 Práce potřebná k přetržení v tahu



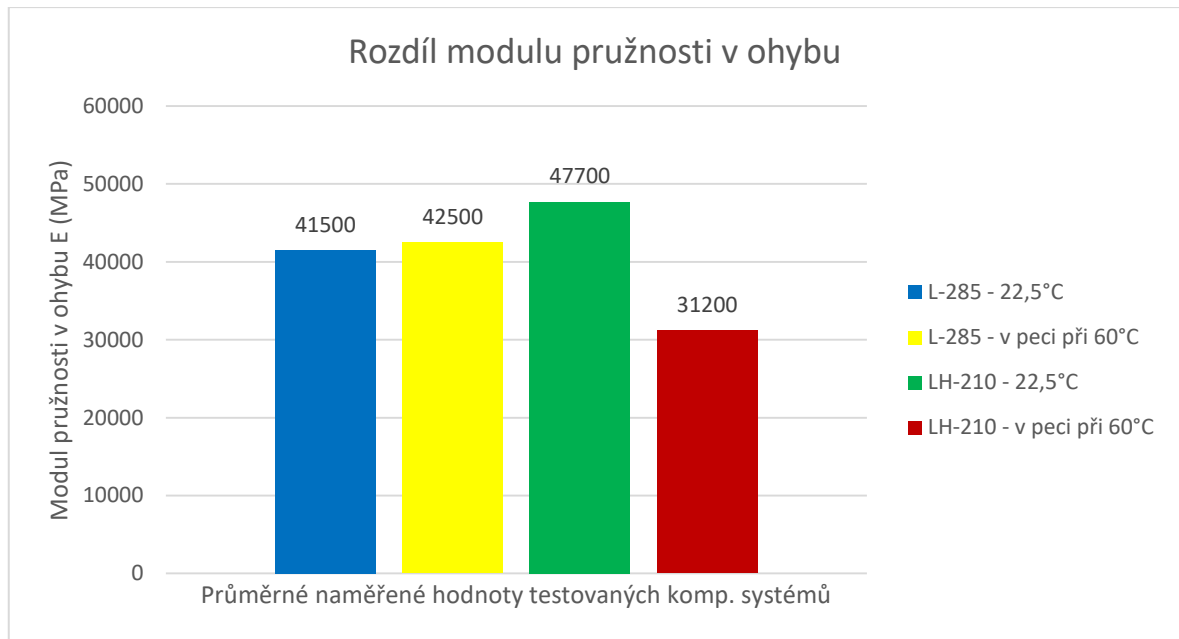
Obr. 39 – Rozdíl práce potřebné k přetržení v tahu

Pro porovnání práce potřebné k přetržení v tahu, lze vidět, že systém s matricí LH-210 převyšuje systém s matricí L-285 o necelou stovku Nmm. Z grafu můžeme lehce vyčíst, že pro systém L-285 došlo ke snížení této práce o 73 Nmm pro vzorek, který byl vytvrzen v peci. Naopak pro systém LH-210 došlo, i když k malému zvýšení potřebné práce. Rozdíl pak mezi vytvrzenými systémy dělá 179 Nmm.

10.2 Porovnání ohybových vlastností

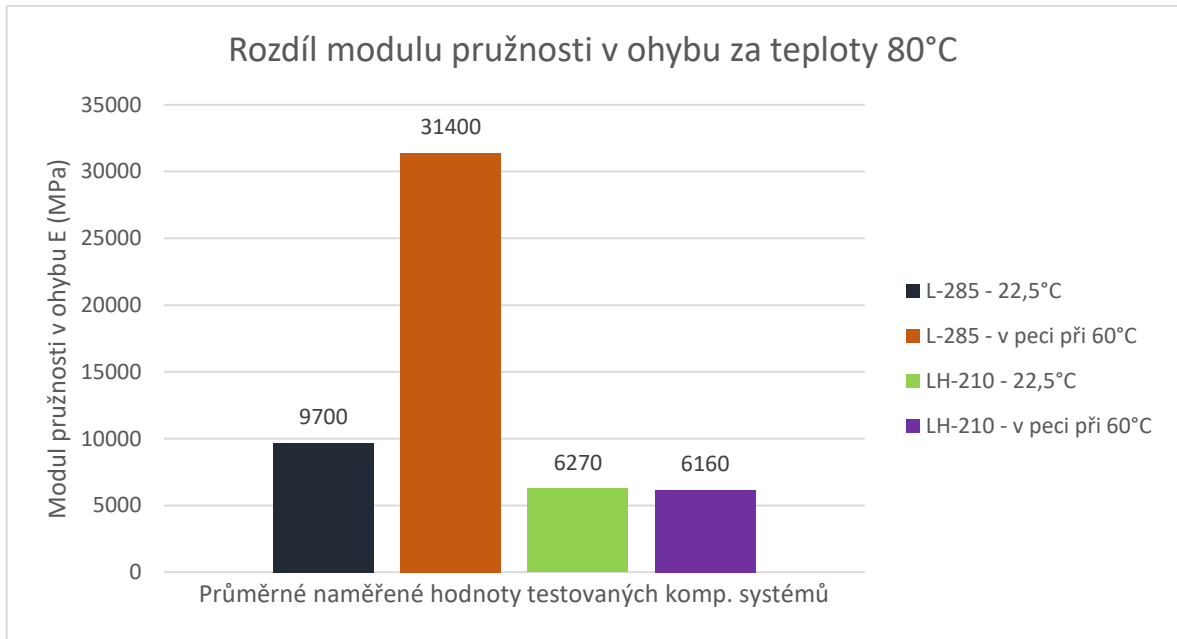
V každém grafu jsou porovnány oba systémy na ohybové vlastnosti. U každého výsledku je zpracováno vyhodnocení, díky kterému může dojít k rozhodnutí o použití systémů v praxi.

10.2.1 Modul pružnosti v ohybu



Obr. 40 – Rozdíl modulu pružnosti v ohybu

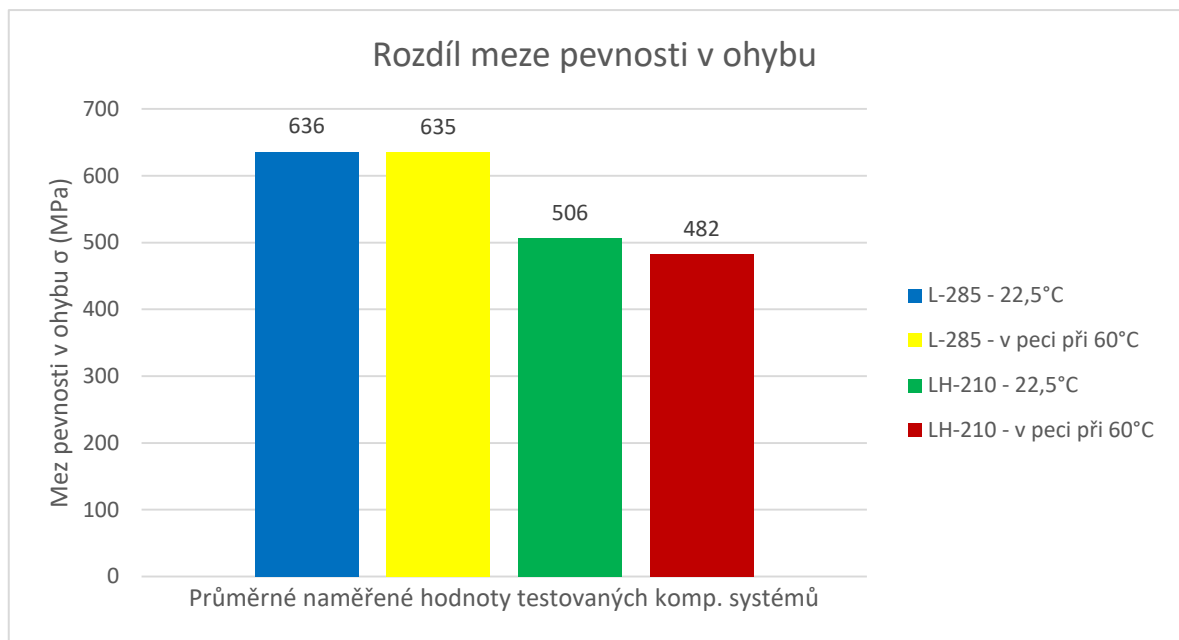
Pro modul pružnosti v ohybu se jeví jako nejlepší systém LH-210 bez předchozího vytvrzení. Po vytvrzení tohoto systému došlo k poklesu modulu pružnosti v ohybu o 16 500 MPa. Což v našem případě je pokles o 35 %. Naopak pro systém L-285 došlo při vytvrzení ke zvýšení o 1000 MPa.



Obr. 41 – Rozdíl modulu pružnosti pro vzorky v teplotní komoře při 80 °C

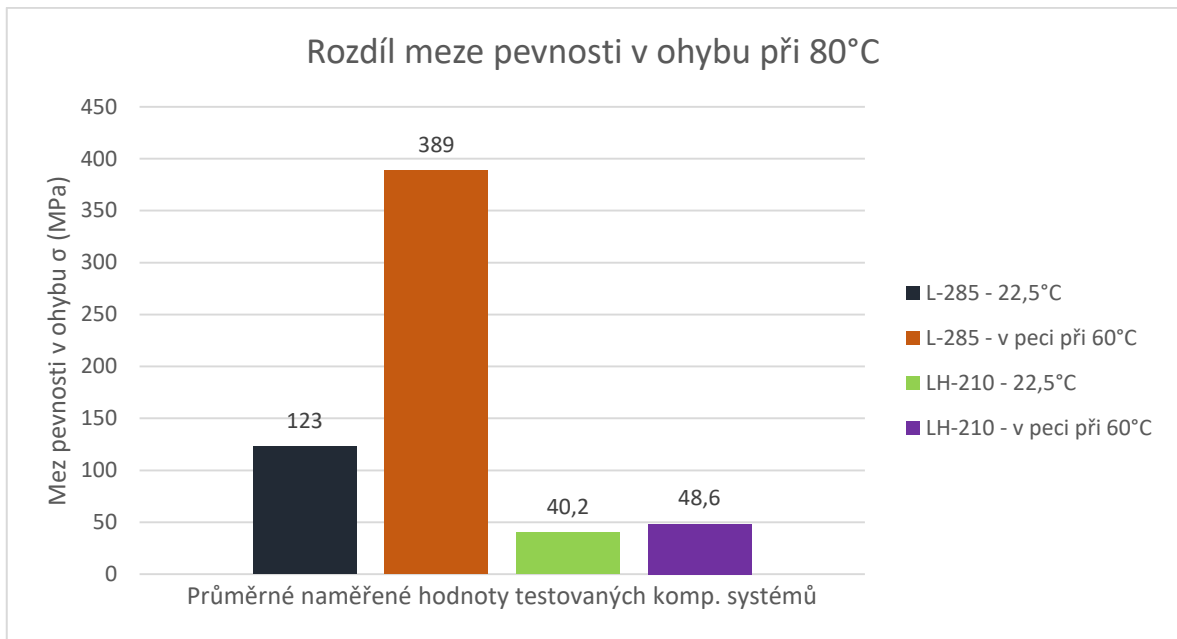
Z výsledků dosažených v teplotní komoře za teploty 80 °C vidíme, jak došlo k poklesu modulu pružnosti skoro u všech systémů. Jediný systém L-285 s předchozím vytvrzením v peci za teploty 60 °C dosáhl modulu pružnosti v ohybu přes 31 tisíc MPa. Lze tedy vidět, že předchozí vytvrzení v peci mělo pozitivní vliv na systém L-285 a to až 3x více než bez vytvrzení. U systému LH-210 nedošlo po vytvrzení k žádným velkým změnám.

10.2.2 Mez pevnosti v ohybu



Obr. 42 – Rozdíl meze pevnosti v ohybu

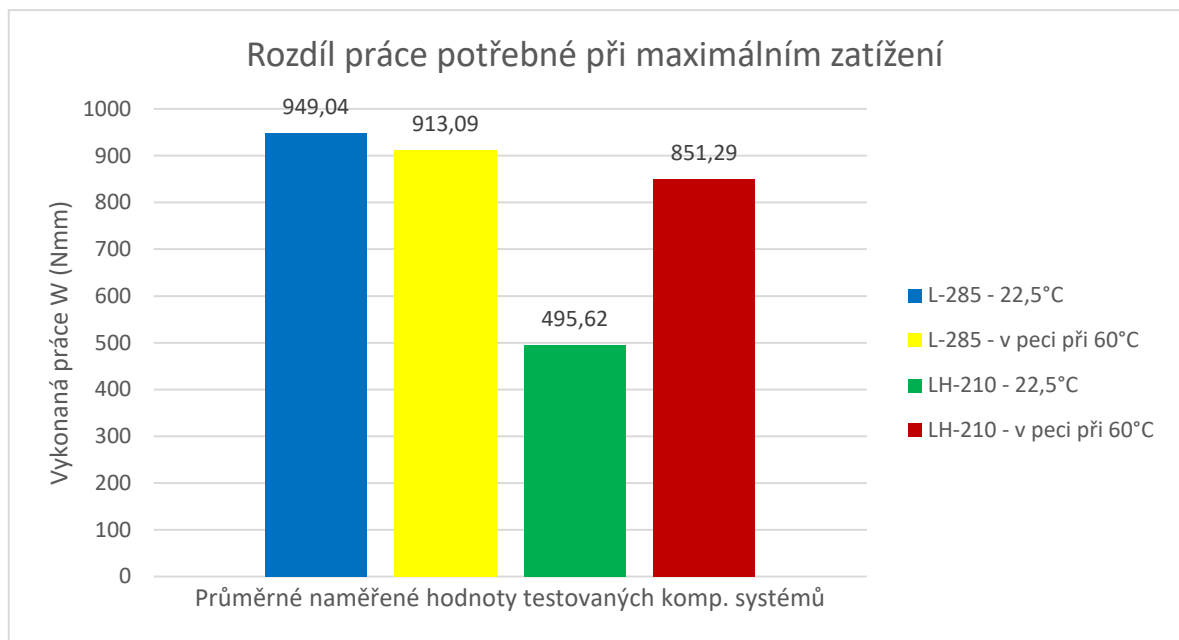
Mez pevnosti v ohybu u systému L-285, nemá před ani po vytvrzení žádný rozdíl. Obě hodnoty pro tento systém jsou skoro shodné a to 635 MPa. U systému s matricí LH-210 však došlo po vytvrzení k menšímu poklesu meze pevnosti o 24 MPa.



Obr. 43 – Rozdíl meze pevnosti pro vzorky v teplotní komoře při 80 °C

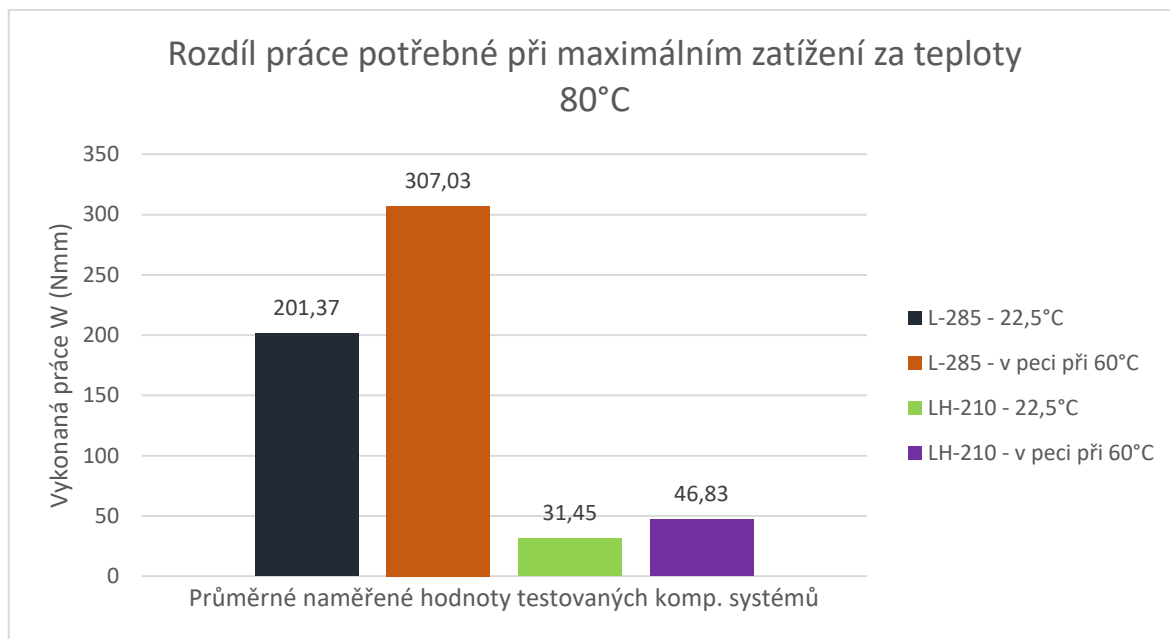
Z tohoto grafu vyplývá, jak má opět vytvrzení u systému L-285 velký vliv na mez pevnosti v ohybu. Sice se oproti testování bez teplotní komory jedná skoro o poloviční hodnotu, i přesto jsou však výsledky při teplotě 80 °C pro systém L-285 až 3x lepší po vytvrzení.

10.2.3 Potřebná práce při maximálním zatížení



Obr. 44 – Rozdíl potřebné práce při maximálním zatížení v ohybu

Pro tento graf lze vidět, že hodnoty u systému s matricí L-285 jsou opět skoro srovnatelné, avšak po vytvrzení systému došlo k menšímu poklesu o 36 Nmm, což jsou 4 %. Jiné je to ovšem u vzorku s matricí LH-210 kde po vytvrzení došlo k nárůstu potřebné práce při maximálním zatížení a to o 356 Nmm.



Obr. 45 – Rozdíl potřebné práce při maximálním zatížení v ohybu vzorků v teplotní komoře při 80 °C

Práce potřebná při maximálním zatížení pro systémy za teploty 80 °C v teplotní komoře je také oproti výsledkům za běžné pokojové teploty velice rozdílná. Např. u systému s matricí L-285 po vytvrzení došlo až k trojnásobnému poklesu hodnot. Tento pokles však byl nejnižší oproti zbývajícím výsledkům. Z grafu lze tedy vidět, že opět pro systém L-285 po vytvrzení platí, že má vyšší hodnotu než před vytvrzením a to o 52 %, tedy 106 Nmm. Pro systém s matricí LH-210 vyplývá, že hodnota po vytvrzení narostla o 15 Nmm.

ZÁVĚR

Diplomová práce byla zaměřena na studii termomechanických vlastností uhlíkových kompozitních systémů. Jedná se tedy o vliv teploty na vlastnosti uhlíkových kompozitních systémů při daných zkouškách. Cílem této práce bylo navrhnout dva různé uhlíkové kompozity, lišící se druhem použité matrice. Zajistit výrobu těchto vzorků dle norem pro zvolené zkoušky tahových a ohybových vlastností. Tyto zkoušky byly provedeny na univerzálním stroji ZWICK 1456. Zkoušky byly provedeny v laboratořích Univerzity Tomáš Bati, za laboratorní teploty 22,5 °C bez i s předchozím vytvrzením vzorků v peci při 60 °C a také v teplotní komoře za zvýšené teploty 80 °C. Celkem bylo vyrobeno 72 kusů zkušebních vzorků ze dvou kompozitních systémů. První systém označený jako L-285 se skládá s uhlíkové tkaniny a matrice s pryskyřicí L-285 a tužidlem 285. Druhý systém značený LH-210 se skládá s uhlíkové tkaniny a matrice s pryskyřicí LH-210 a tužidlem H10.

Z naměřených výsledků byly v práci uvedeny tabulky a grafy, ze kterých došlo k vypracování finálních sloupcových grafů, díky kterým bylo možno porovnat výsledky obou systémů za určitých teplot. Z těchto grafů došlo k vytvoření vyhodnocení jednotlivých zkoumaných vlastností daných uhlíkových kompozitních systémů.

Z výsledků pro tahové vlastnosti lze usoudit, že systém L-285 byl skoro ve všech vlastnostech lepší než systém LH-210. Pro modul pružnosti v tahu i mez pevnosti v tahu vyplývá, že u každého systému došlo při vytvrzení ke zlepšení těchto vlastností. Pro systém LH-210 dokonce došlo i k nárůstu potřebné práce při přetržení, naopak tomu bylo u systému L-285, kde došlo k poklesu.

Z výsledků pro ohybové vlastnosti vyplývá, že pro systém L-285 po vytvrzení nikdy nedošlo k poklesu hodnot, naopak buď hodnoty znatelně narůstaly, nebo nedošlo k žádným změnám. Pro měření za zvýšené teploty 80 °C pokaždé došlo k velkému poklesu vlastností, nutno podotknout, že i přes takové velké poklesy vycházel systém L-285 po vytvrzení vždy s nejlepšími výsledky. Dle dosažených hodnot při zkoušce, můžeme pozorovat, že pro systém LH-210 ať už s vytvrzením nebo bez, dochází k obrovskému poklesu hodnot za teplot při 80°C. Tento systém se za tak vysoké teploty choval skoro plasticky, až při zchladnutí došlo k jeho opětovnému zafixování tvaru a ke zpevnění vzorku.

Z naměřených dat vyplývá, že uhlíkový kompozitní systém s matricí L-285 má lepší tahuvé i ohybové vlastnosti než systém s matricí LH-210. Co je z výsledků patrné je, že vytvrzení u obou kompozitních systémů ve většině zkoumaných vlastností navýšilo a zlepšilo jejich hodnoty. Dále můžeme říci, že systém L-285 splnil prvotní předpokládané vlastnosti a dle technických listů došlo po vytvrzení ke zlepšení vlastností a tudíž systém splňuje standart pro větroně, kde je teplota použití do 54 °C. Z výsledku tedy patrné, že při 80 °C opravdu dochází k velkému zhoršení vlastností uhlíkového kompozitního systému s matricí L-285.

Dle naměřených výsledků můžeme říci, že systém s matricí LH-210 se opravdu nemůže používat za vysokých teplot a pokles jeho vlastností při 80 °C je fatální. Celkově jeho vlastnosti byly horší než u systému s L-285. Technický list uvádí, že pryskyřice je sice chemicky odolná a perfektně čirá, avšak s ní má systém vyznačovat vysokou tvrdost. Jak lze tedy s výsledků vidět, za vysoké teploty tohle tvrzení neplatí a opravdu je možno tuto matrici použít jen pro pohledové a nezatížené systémy.

Můžeme tedy vyhodnotit, že za teplot kolem 80°C je systém s matricí LH-210 absolutně nevhodný i s předchozím vytvrzením a pro systém s matricí L-285 by muselo dojít k vyšší teplotě vytvrzení, jak udává technický list.

Na závěr můžeme říci, že ani jeden ze systému není vhodný pro použití dílců zatížené dlouhodobě při vysokých teplotách, slunečnímu záření, atd.... aniž by nedošlo ke změně jeho vlastností, které by mohly ovlivnit funkci či chod zařízení takovým teplotám vystavenému.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] MIKULA, M. *Kompozitní materiály na bázi uhlíkových vláken*. Brno, 2012. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Vedoucí bakalářské práce Ing. Karel Němec, Ph.D.
- [2] AUTOR NEUVEDEN *mineralogie.sci.muni.cz*. [online]. [cit. 27. 1. 2017]. Dostupné z: http://mineralogie.sci.muni.cz/kap_6_5_diagram/obrazek65_1.htm
- [3] AUTOR NEUVEDEN. *ped.muni.cz* [online]. [cit. 28. 1. 2017]. Dostupný na WWW: <http://www.ped.muni.cz/wphy/fyzvla/fmkomplet4.htm>
- [4] AUTOR NEUVEDEN. *fyzmatik.pise.cz* [online]. [cit. 28. 1. 2017]. Dostupný na WWW: <http://fyzmatik.pise.cz/988-grafen-material-budoucnosti.html>
- [5] LEGENDRE, A. *Uhlíkové materiály: Od černé keramiky k uhlíkovým vláknům*. Vyd. 1. Praha: Informatorium, 2001. ISBN 80-86073-82-3
- [6] PIERSON, H. *Handbook of carbon, graphite, diamond and fullerenes: properties, processing and applications*. 1993. [online]. [cit. 25. 1. 2017]. Dostupné z: http://dlia.ir/Scientific/e_book/Technology/Chemical_Technology/TP_200_248_Chemical_s_Manufacture_Use_etc_/052322.pdf ISBN 0-8155-1339-9
- [7] HRAZDIRA, M. *Materiály na bázi uhlíku a jejich využití*. Brno, 2010. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Vedoucí bakalářské práce Ing. Lenka Klakurková, Ph.D.
- [8] GRÉGR, J. *Povrchové vlastnosti uhlíkových vláken*. 2004. [online]. [cit. 25. 1. 2017]. Dostupné z: http://centrum.tul.cz/centrum/centrum/3Aplikace/3.1_zaverecne_zpravy/%5B3.1.09%5D.pdf
- [9] HEXCEL. *Prepreg Technology*. 2005. [online]. [cit. 25. 1. 2017]. Dostupné z: http://www.hexcel.com/Resources/DataSheets/Brochure-Data-Sheets/Prepreg_Technology.pdf
- [10] HEXCEL INDUSTRY. *hexcel.com* [online]. [cit. 28. 1. 2017]. Dostupný na WWW: http://www.hexcel.com/resources/selectorguides/industrial_selectorguide.pdf
- [11] VRBKA, J. *Mechanika kompozitů*. Brno, 2008. Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky, Fakulta strojního inženýrství VUT v Brně. [online]. [cit. 25. 1. 2017]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/priloha.php?dpid=83340
- [12] JANČÁR, J. *Úvod do materiálového inženýrství polymerních kompozitů*. Brno, 2003. 1. vydání. VUT v Brně, Fakulta chemická. ISBN 8021424435

- [13] KOŘÍNEK, Z. *Kompozity*. [online]. [cit. 25. 1. 2017]. Dostupné z: <http://www.volny.cz/zkorinek>
- [14] DAŘOUREK, K. *Kompozitní materiály - druhy a jejich užití*. 2007, Liberec. 1. vydání. Technická univerzita v Liberci. ISBN 978-80-7372-279-1
- [15] EHRENSTEIN, G. *Polymerní kompozitní materiály*. 2009. Vydání 1. Praha: Scientia. ISBN 978-80-86960-29-6
- [16] LISZEWSKI, A. *This RC Carbon Fiber Glider Looks Like a Stealthy Paper Airplane*. 2014. [online]. [cit. 23. 4. 2017]. Dostupné z: <http://gizmodo.com/this-rc-carbon-fiber-glider-looks-like-a-stealthy-paper-1664085145>
- [17] HAK, D. a kol. *Use of Carbon-Fiber-Reinforced Composite Implants in Orthopedic Surgery*. 2014. [online]. [cit. 23. 4. 2017]. Dostupné z: <http://www.healio.com/orthopedics/journals/ortho/2014-12-37-12/%7B1398a9c1-57fe-427e-b758-1c9a14e0acbc%7D/use-of-carbon-fiber-reinforced-composite-implants-in-orthopedic-surgery>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

PAN	Polyakrylonitril
PVC	Polyvinylchlorid
UD	Unidirection (Jednosměrné)
GFEC	French Carbon Group
VGCF	Vapor Grown Carbon Fibers (Parou vzrostlá uhlíková vlákna)
GFK	Glass Fiber Kompozite (Sklovláknový Kompozit)
CFK	Carbon Fiber Kompozite (Uhlíkovláknový Kompozit)
AFK	Aramide Fiber Kompozite (Aramidovláknový Kompozit)
HT	High Tensile (Vysoká pevnost)
IM	Intermediate Modulus (Střední modul)
HM	High Modulus (Vysoký modul)
UHM	Ultra High Modulus (Ultra Vysoký modul)
W	Práce
σ	Mez pevnosti v tahu nebo ohybu
ε	Poměrné prodloužení
Q	Příčný směr
E	Modul pružnosti v tahu nebo ohybu
G	Modul pružnosti ve smyku
v	Variační koeficient
\bar{x}	Aritmetický průměr
s	Směrodatná odchylka
ρ	Hustota
α	Součinitel teplotní roztažnosti
T	Teplota

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 1 – fázový diagram uhlíku [2]</i>	14
<i>Obr. 2 – Grafenová vrstva [4]</i>	15
<i>Obr. 3 - Hexagonální grafit a jeho mřížka [3]</i>	15
<i>Obr. 4 – Tabulka s vlastnostmi rozmanitých forem uhlíkových materiálů [5]</i>	16
<i>Obr. 5 – Způsoby získávání uhlíkových materiálů [5]</i>	17
<i>Obr. 6 – Schéma výroby vláken PAN [5]</i>	20
<i>Obr. 7 – RC model kompletně vyrobený z uhlíkového kompozitu [16]</i>	21
<i>Obr. 8 – Kostní výztuže a náhrady z uhlíkového kompozitu [17]</i>	22
<i>Obr. 9 - Sendvičová struktura, zde s voštinovým jádrem „honeycomb“ [9]</i>	23
<i>Obr. 10 – Nejběžnější provedení dvousměrného tkaní [10]</i>	24
<i>Obr. 11- Závislost meze pevnosti vlákna na jeho délce [11]</i>	25
<i>Obr. 12 – Závislost součinitele teplotní roztažnosti jednosměrně vyztuženého kompozitu skleněným (GFK), uhlíkovým (CFK) a aramidovým (AFK) vláknem na objemovém podílu vláken [15]</i>	31
<i>Obr. 13 - Roviny symetrie jednosměrně vyztužené vrstvy [15]</i>	32
<i>Obr. 14 – Rovnovážná dvojvrstva [15]</i>	34
<i>Obr. 15 – Model rohožové vrstvy [15]</i>	38
<i>Obr. 16 – Plátňová uhlíková tkanina</i>	41
<i>Obr. 17 – Voskem ošetřená čistá skleněná deska</i>	45
<i>Obr. 18 – Navážená a nastříhaná uhlíková tkanina</i>	46
<i>Obr. 19 – Prosycené vrstvy uhlíkové tkaniny s matricí</i>	47
<i>Obr. 20 – Velikost testovacích vzorků (levý-ohyb-25x100mm, pravý-tah-25x250mm)</i>	48
<i>Obr. 21 – ZWICK 1456 včetně teplotní komory</i>	49
<i>Obr. 22 – Vestavná trouba Fagor 6H-175X</i>	50
<i>Obr. 23 – Příklad prasknutí testovacího vzorku zatíženého tahem</i>	52
<i>Obr. 24 – Graf závislosti meze pevnosti v tahu na prodloužení u vzorků s matricí L-285 při teplotě 22,5 °C</i>	54
<i>Obr. 25 - Graf závislosti meze pevnosti v tahu na prodloužení u vzorků s matricí L-285 při teplotě 22,5 °C s přechozím vytvrzením 60 °C</i>	56
<i>Obr. 26 - Graf závislosti meze pevnosti v tahu na prodloužení u vzorků s matricí LH-210 při teplotě 22,5 °C</i>	58

<i>Obr. 27 - Graf závislosti meze pevnosti v tahu na prodloužení u vzorků s matricí LH-210 při teplotě 22,5 °C s předchozím vytvrzením 60 °C</i>	<i>59</i>
<i>Obr. 28 – Příklad testování třibodovým ohybem v teplotní komoře</i>	<i>60</i>
<i>Obr. 29 - Graf závislosti meze pevnosti v ohybu na prodloužení u vzorků s matricí L-285 při teplotě 22,5 °C</i>	<i>62</i>
<i>Obr. 30 - Graf závislosti meze pevnosti v ohybu na prodloužení u vzorků s matricí L-285 při teplotě 22,5 °C s předchozím vytvrzením 60 °C</i>	<i>63</i>
<i>Obr. 31 - Graf závislosti meze pevnosti v ohybu na prodloužení u vzorků s matricí L-285 při teplotě 80 °C s předchozím vytvrzením 22,5 °C</i>	<i>65</i>
<i>Obr. 32 - Graf závislosti meze pevnosti v ohybu na prodloužení u vzorků s matricí L-285 při teplotě 80 °C s předchozím vytvrzením 60 °C</i>	<i>66</i>
<i>Obr. 33 - Graf závislosti meze pevnosti v ohybu na prodloužení u vzorků s matricí LH-210 při teplotě 22,5 °C</i>	<i>68</i>
<i>Obr. 34 - Graf závislosti meze pevnosti v ohybu na prodloužení u vzorků s matricí LH-210 při teplotě 22,5 °C s předchozím vytvrzením 60 °C</i>	<i>69</i>
<i>Obr. 35 - Graf závislosti meze pevnosti v ohybu na prodloužení u vzorků s matricí LH-210 při teplotě 80 °C s předchozím vytvrzením 22,5 °C</i>	<i>71</i>
<i>Obr. 36 - Graf závislosti meze pevnosti v ohybu na prodloužení u vzorků s matricí LH-210 při teplotě 80 °C s předchozím vytvrzením 60 °C</i>	<i>72</i>
<i>Obr. 37 – Rozdíl modulu pružnosti v tahu</i>	<i>73</i>
<i>Obr. 38 – Rozdíl meze pevnosti v tahu</i>	<i>74</i>
<i>Obr. 39 – Rozdíl práce potřebné k přetržení v tahu</i>	<i>75</i>
<i>Obr. 40 – Rozdíl modulu pružnosti v ohybu</i>	<i>76</i>
<i>Obr. 41 – Rozdíl modulu pružnosti pro vzorky v teplotní komoře při 80 °C</i>	<i>77</i>
<i>Obr. 42 – Rozdíl meze pevnosti v ohybu</i>	<i>78</i>
<i>Obr. 43 – Rozdíl meze pevnosti pro vzorky v teplotní komoře při 80 °C</i>	<i>79</i>
<i>Obr. 44 – Rozdíl potřebné práce při maximálním zatížení v ohybu</i>	<i>80</i>
<i>Obr. 45 – Rozdíl potřebné práce při maximálním zatížení v ohybu vzorků v teplotní komoře při 80 °C</i>	<i>81</i>

SEZNAM TABULEK

<i>Tab. 1 – Mechanické vlastnosti vybraných vláken [11]</i>	26
<i>Tab. 2 – Pevnosti skleněných vláken [15]</i>	27
<i>Tab. 3 – Srovnání vlastností vybraných kompozitů [15]</i>	29
<i>Tab. 4 – Součinitelé teplotní roztažnosti různých složek kompozitu [15]</i>	30
<i>Tab. 5 – Parametry uhlíkové tkaniny</i>	41
<i>Tab. 6 – Specifikace pryskyřice L-285</i>	42
<i>Tab. 7 – Specifikace tužidla 285</i>	42
<i>Tab. 8 – Specifikace pryskyřice LH-210</i>	43
<i>Tab. 9 – Specifikace tužidla H-10</i>	43
<i>Tab. 10 – Specifikace separačního vosku M-700/C</i>	44
<i>Tab. 11 – Vstupní hmotnosti materiálů pro systém L-285</i>	45
<i>Tab. 12 - Vstupní hmotnosti materiálů pro systém LH-210</i>	46
<i>Tab. 13 – Technické parametry stroje ZWICK 1456</i>	50
<i>Tab. 14 – Technické parametry vestavné trouby Fagor</i>	51
<i>Tab. 15 – Tahová zkouška vzorků s matricí L-285 při teplotě 22,5 °C</i>	53
<i>Tab. 16 – Průměrné hodnoty tahové zkoušky vzorků s matricí L-285 při teplotě 22,5 °C</i>	54
<i>Tab. 17 - Tahová zkouška vzorků s matricí L-285 při teplotě 22,5 °C s předchozím vytvrzením 60 °C</i>	55
<i>Tab. 18 - Průměrné hodnoty tahové zkoušky vzorků s matricí L-285 při teplotě 22,5 °C s předchozím vytvrzením 60 °C</i>	55
<i>Tab. 19 - Tahová zkouška vzorků s matricí LH-210 při teplotě 22,5 °C</i>	57
<i>Tab. 20 - Průměrné hodnoty tahové zkoušky vzorků s matricí LH-210 při teplotě 22,5 °C</i>	57
<i>Tab. 21 - Tahová zkouška vzorků s matricí LH-210 při teplotě 22,5 °C s předchozím vytvrzením 60 °C</i>	58
<i>Tab. 22 - Průměrné hodnoty tahové zkoušky vzorků s matricí LH-210 při teplotě 22,5 °C s předchozím vytvrzením 60 °C</i>	59
<i>Tab. 23 - Ohybová zkouška vzorků s matricí L-285 při teplotě 22,5 °C</i>	61
<i>Tab. 24 - Průměrné hodnoty ohybové zkoušky vzorků s matricí L-285 při teplotě 22,5 °C</i>	61

<i>Tab. 25 - Ohybová zkouška vzorků s matricí L-285 při teplotě 22,5 °C s předchozím vytvrzením 60 °C</i>	<i>62</i>
<i>Tab. 26 - Průměrné hodnoty ohybové zkoušky vzorků s matricí L-285 při teplotě 22,5 °C s předchozím vytvrzením 60 °C</i>	<i>63</i>
<i>Tab. 27 - Ohybová zkouška vzorků s matricí L-285 při teplotě 80 °C s předchozím vytvrzením 22,5 °C</i>	<i>64</i>
<i>Tab. 28 - Průměrné hodnoty ohybové zkoušky vzorků s matricí L-285 při teplotě 80 °C s předchozím vytvrzením 22,5 °C</i>	<i>64</i>
<i>Tab. 29 - Ohybová zkouška vzorků s matricí L-285 při teplotě 80 °C s předchozím vytvrzením 60 °C</i>	<i>65</i>
<i>Tab. 30 - Průměrné hodnoty ohybové zkoušky vzorků s matricí L-285 při teplotě 80 °C s předchozím vytvrzením 60 °C</i>	<i>66</i>
<i>Tab. 31 - Ohybová zkouška vzorků s matricí LH-210 při teplotě 22,5 °C</i>	<i>67</i>
<i>Tab. 32 - Průměrné hodnoty ohybové zkoušky vzorků s matricí LH-210 při teplotě 22,5 °C</i>	<i>67</i>
<i>Tab. 33 - Ohybová zkouška vzorků s matricí LH-210 při teplotě 22,5 °C s předchozím vytvrzením 60 °C</i>	<i>68</i>
<i>Tab. 34 - Průměrné hodnoty ohybové zkoušky vzorků s matricí LH-210 při teplotě 22,5 °C s předchozím vytvrzením 60 °C</i>	<i>69</i>
<i>Tab. 35 - Ohybová zkouška vzorků s matricí LH-210 při teplotě 80 °C s předchozím vytvrzením 22,5 °C</i>	<i>70</i>
<i>Tab. 36 - Průměrné hodnoty ohybové zkoušky vzorků s matricí LH-210 při teplotě 80 °C s předchozím vytvrzením 22,5 °C</i>	<i>70</i>
<i>Tab. 37 - Ohybová zkouška vzorků s matricí LH-210 při teplotě 80 °C s předchozím vytvrzením 60 °C</i>	<i>71</i>
<i>Tab. 38 - Průměrné hodnoty ohybové zkoušky vzorků s matricí LH-210 při teplotě 80 °C s předchozím vytvrzením 60 °C</i>	<i>72</i>

SEZNAM PŘÍLOH

PI – Technický list – Vosk Oskar M 700

PII – Technický list – Pryskeřice L-285 a tuřidlo 285

PIII – Technický list – Pryskeřice LH-210

PIV – Technický list – Tuřidlo H10

Na CD ve složce Přílohy jsou:

PV – Technický list – Tuřidlo H10A

PVI – Technická norma – ČSN EN ISO 527-4

PVII – Technická norma – ČSN EN ISO 14125

PVIII – Naměřené hodnoty TestExpert II

PIX – Tabulky vybraných výsledků

PX – Grafy naměřených hodnot

PŘÍLOHA P I: TECHNICKÝ LIST SEPARAČNÍHO VOSKU

Oskar's M-700

Název: Oskar's M-700 Separáční vosk na formy

Všeobecně: M-700 je tuhá emulze čistého karnaubského vosku v uhlovodíkových rozpouštědlech a vodě. Vytváří velmi tvrdou, odolnou a lesklou vrstvu. Oskar's M-700 neobsahuje silikony.

Složení: M-500 obsahuje čistý karnaubský vosk, benzinovou frakci, emulgátor a vodu. Neobsahuje morfolín, terpentýn ani silokony.

Vzhled:	tuhá voskovitá pasta
Barva:	nažloutlá, s nádechem do hněda
Zápach:	téměř bez zápachu
Měrná hmotnost:	0,88 g/ml při 20°C
Hodnota pH:	nelze měřit
Bod vzplanutí:	více, než 65°C
Teplota vznícení:	300°C
Meze výbušnosti:	0,6-6,5 obj. %
Rozpusťnost:	částečně v uhlovodících, nerozpustná ve vodě

Balení: Plechovky o obsahu 425 g , krabice se 12 plechovkami

Skladování: M-700 má skladovatelnost min. 24 měsíců, pokud je uchovávána v originálních, neotevřených plechovkách na suchém a chladném místě. Vyvarujte se skladování za teplot pod bodem mrazu a dlouhodobě nad 30°C.

Bezpečnostní údaje

Vše je uvedeno v Bezpečnostním listě, se kterým je nutno se před prvním použitím výrobku seznámit.

Označení nebezpečí

Oskar's M-700 je označován jako **X_n** – Zdraví škodlivý.

PŘÍLOHA P II: TECHNICKÝ LIST PRYSKYŘICE L-285 A TUŽIDLA 285

LAMINAČNÍ PRYSKYŘICE L 285 TUŽIDLA 285, 286, 287

Návod k použití, technické listy

Charakteristika

Schválení:	Německý federální úřad pro letectví
Použití:	výroba kluzáků, motorových kluzáků a motorových letadel, lodě a stavba lodí, sportovní nářadí, letecké modely, formy a nástroje
Teplotní odolnost výrobků výrazných bez změn jejich parametrů:	- 60 °C - □ + 50 -60 °C za temperování - 60 °C - □ + 80 -+ 100 °C po temperování
Zpracování:	Při teplotách mezi 10 °C a 50 °C Všechny běžné metody zpracování
Zvláštní vlastnosti:	Extrémně dobrá fyziologická kompatibilita Dobré mechanické a tepelné vlastnosti Doba zpracovatelnosti (tzv. pot life) od přibližně 45 minut do asi 5 hodin (závisí na použitém tužidle)
Zvláštní úpravy:	L 285 T: tixotropní L 285 K2: tixotropní tepelná úprava L 285 W: bílá

Použití

Systém laminační pryskyřice, schválený německým federálním úřadem pro letectví, má rozdílné doby zpracovatelnosti (v závislosti na použitém tužidle) pro výrobu s použitím skelných, uhlíkových a kevlarových vláken a vyznačuje se vysokými statickými a dynamickými vlastnostmi.

Po tepelném vytvrzení při 50 - 55 °C systém splňuje standard pro větroně a motorové větroně (pracovní teplota - 60 °C až + 54 °C. Pro splnění požadavků motorových letadel (pracovní teploty - 60 °C až + 72 °C) je nezbytné tepelné vytvrzení při 80 °C.

Rozmezí doby zpracovatelnosti (tzv. pot life) je mezi přibližně 45 min. a 5 h v závislosti na druhu tužidla. Tužidla mají stejný poměr míchání a mohou být míchány mezi sebou v jakémkoli poměru. Toto dovoluje výběr optimálního systému pro všechny metody zpracování. Po počátečním vytvrzení při pokojové teplotě jsou vyrobené komponenty

opracovatelné a lze je vytáhnout z formy. Získáte vysoce se lesknoucí a nelepivé povrchy, a to dokonce i při nepříznivých podmínkách při vytvrzování, tj. nižší teploty nebo vysoká vlhkost.

Viskozita směsi zaručuje rychlé a dokonalé prosycení vláken, nicméně, pryskyřice se nerozlije na tkanině na vertikálním povrchu. Za účelem získání zvláštních vlastností je rovněž možné přidat ke směsi pryskyřice/tužidlo nejrůznější plniva, např. aerosil, mikrobalony, bavlněné vločky, kovový prášek apod.

Pokud se nevyžaduje vysoká tepelná odolnost či letecké schválení, dá se tužidlo 285 použít bez následného temperování. Nicméně, uvedené vlastnosti získá pouze po tepelném vytvrzení při teplotách nad 50 °C.

Použití

Laminační systém má hydrofilní charakter (vyšší absorpce vlhkosti, nižší odpor rozptýlu páry). Proto neočekáváme žádné problémy kompatibility při jeho kombinaci s polyesterovými gelcoaty, rozmanitými barvami (např. na bázi PUR) atd. Bohužel však nemáme k dispozici testy těchto kombinací.

Od svého schválení v roce 1985 byl laminační systém L 285 používán téměř všemi výrobci letadel a kluzáků a - zvláště kvůli své extrémně dobré fyziologické kompatibilitě - je nejvíce užívaným systémem dnešního leteckého průmyslu. Často se stává, že pracovníci, kteří zaznamenali problémy s některými epoxidy (alergie či podráždění pokožky), jsou schopni zpracovávat laminační pryskyřici L 285.

Je nutno dodržovat příslušná bezpečnostní pokyny pro manipulaci s epoxidovými pryskyřicemi a tužidlo a naše instrukce pro bezpečné zpracování.

Specifikace

		Laminační pryskyřice L 285
Hustota °C	g/cm ³ / 25	1,18 - 1,23
Viskozita	mPas / 25 °C	600 - 900
Ekvivalent epoxidu	-	165 - 170
Hodnota epoxidu	-	0,59 - 0,65
Barva Gardner		max 3

Míchací poměry

	Pryskyřice L 285: Tužidlo 285, 286, 287
Složky váhově	100 : 40 (+/-2)
Složky objemově	100 : 50 (+/-2)

Gel time

- nános do vrstvy 1 mm při různých teplotách

	Tužidlo 285	Tužidlo 286	Tužidlo 287
20 - 25 °C	přibl. 2 - 3 hod.	přibl. 3 - 4 hod.	přibl. 5 - 6 hod.
40 - 45 °C	přibl. 45 - 60 min.	přibl. 60 - 90 min.	přibl. 80 - 120 min

Mechanická data nezesílené pryskyřice

Hustota	g/cm ³	1,18 - 1,20
Pevnost v ohybu	psi x 10 ³ N/ mm ²	16 - 18 110 - 120
Modul pružnosti	psi x 10 ⁵ kN/mm ²	4,6 - 4,8 3,0 - 3,3
Pevnost v tahu	psi x 10 ³ kN/mm ²	10 - 11,5 70 - 80
Pevnost v tlaku	psi x 10 ³ kN/mm ²	18 - 20 120 - 140
Průtažnost	%	5 - 6,5
Síla nárazu	Nmm/mm ²	45 - 55
Pevnost ve stříhu	D	80 - 85
Absorpce vody %	24 h 23 °C 7 d/ 23 °C	0,20 - 0,30 0,60 - 0,80
Odolnost proti únavě pod tlakem na obrácený ohyb dle DLR Brunsw. 90 %	10 %	2 X 10 ⁴ 2 X 10 ⁶
Vytvrzení:	24 h při 23 °C	+ 15 při 60 °C

PŘÍLOHA P III: TECHNICKÝ LIST PRYSKYŘICE LH-210

TECHNICKÝ LIST

Datum vydání: 01.09.2004
Datum revize: 01.10.2004

Verze 2.0
strana 1/2

Epoxidová pryskyřice LH 210

Popis:

Pryskyřice LH 210 je nízkoviskózní pryskyřice na bázi pryskyřice typu bifenol A (Vyrobeno z bifenolu A a epichlorhydrinu), obsahující určité množství bifunkčního reaktivního ředidla.

Použití:

Pryskyřice LH 210 má velmi dobrou odolnost proti krystalizaci za nízkých teplot. Její velmi nízká viskozita umožňuje dobrou manipulaci při aplikacích, zejména při laminování. Vytvrzený systém se vyznačuje vysokou tvrdostí i chemickou odolností a předurčuje tuto pryskyřici k použití pro výrobu kompozitů. Pryskyřice LH 210 je rovněž použitelná jako surovina pro nátěrové systémy a ostatní civilní průmyslová odvětví (podlahové směsi, lepidla, omítkové směsi).

Epoxidový systém LH 210/H 10 byl vyvíjen na základě požadavků téměř čtyři měsíce a pak testován další dva měsíce.

Systém vykazuje extrémní průzračnost a minimální smršťivost. Navíc je velmi šetrný k životnímu prostředí a Vašemu zdraví, protože během vytvrzování nebyli naměřeny téměř žádné škodlivé výpary. Také při dermatologických testech systém vykazoval extrémně dobrou snášenlivost a nevyvolával žádné alergické reakce. Díky novému tužidlu H 10 které je UV stabilní výrazně potlačuje oxidaci a následné žloutnutí laminátu. Spolu s tkaninami Porcher nebo Interglas dovoluje vyrobit velmi čirý laminát.

Tento nový systém patří mezi jedny z nejdražších laminačních a odlévacích systémů což dovoluje při jeho výrobě použít opravdu ty nejkvalitnější suroviny.

Vytvrzuje již od +10°C.

Doba zpracovatelnosti je cca 30 min.

Poměr míchání je 100:45 (váhově)

Tento laminační systém můžete objednat také v našem e-obchodě, který je Vám k dispozici 24 h denně.

Více informací získáte na +420 603 847 655 nebo na havel@havel-composites.cz

Technické parametry:

Vlastnost	Jednotka	Hodnota
Obsah epoxy skupin	mmol/kg	5500 - 6000
Epoxy ekvivalent	-	0,55 – 0,60
Teplotní stálost při vytvrzení při 25 °C (min.2 dny)	°C	50
Teplotní stálost při vytvrzení při 50 – 60 °C (3 hodiny)	°C	80 - 90
Epoxidová molární hmotnost*	g	166 - 182
Viskozita při 25 °C	Pa/s	0,7 – 0,9
Barva	Pt/Co stupnice	150 max
Teplota vytvrzení	°C	již od 10°C

*Kolik gramů pryskyřice obsahuje 1g-epoxidový ekvivalent (hmotnostní ekvivalent)

Typické parametry:

Vlastnost	Jednotka	Hodnota
Měrná hmotnost při 25°C	kg/l	1,15
Bod zápalu (PMCC)	°C	149
Viskozita		
5°C	Pa . s	9.0
10°C	Pa . s	4.3
15°C	Pa . s	2.2
20°C	Pa . s	1.2
25°C	Pa . s	0.8

Speciální vlastnosti:

- nízká viskozita
- dobré mechanické vlastnosti
- šetrná k pokožce

PŘÍLOHA P IV: TECHNICKÝ LIST TUŽIDLA H10

Tužidlo H 10

Technický list, instrukce k použití

Charakteristika:	Tekuté tužidlo do epoxidových pryskyřic na bázi aduktu cykloalifatických aminů.
Aplikace:	Výroba laminátů s požadavkem na čírost Poměry míchání 100:50 LH 130 LH 145 LH 160 LH 210 LH 1000 Zpracovatelnost při 25°C cca 15-25 min.
Procesní teplota:	10-32°C alespoň 3°C nad rosným bodem
Aplikační metody:	Ruční laminace
Speciální vlastnosti:	UV stabilita Extra čírost

Úvod

Tužidlo H 10 se používá k vytvrzení epoxidových systémů se zvýšenou UV stabilitou především pro odlévací, laminační, krycí a lepidlové epoxidové systémy. Zpracování může probíhat nejnižší při 10°C.

Předností výrobků je excelentní hladkost a dobré povrchové vlastnosti.

Vhodné pro výrobu laminátů se sklenými tkaninami Porcher nebo Interglass.

Atesty

Nejsou