

Vliv změny podmínek vytvrzování na vlastnosti produktu

Bc. Tibor Tikl

Diplomová práce
2017



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

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

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Tibor Tikl**
Osobní číslo: **T15686**
Studijní program: **N2808 Chemie a technologie materiálů**
Studijní obor: **Inženýrství polymerů**
Forma studia: **kombinovaná**

Téma práce: **Vliv podmínek vytvrzování na vlastnosti produktu**

Zásady pro vypracování:

- 1) Vypracujte literární rešerši na zadané téma
- 2) Vytvořte zkušební vzorky při různých podmínkách vytvrzování
- 3) Vyberte vhodné zkušební metody
- 4) Naměřte vybrané charakteristiky
- 5) Vyhodnoťte a diskutujte dosažené výsledky.

Rozsah diplomové práce:

Rozsah příloh:

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

Seznam odborné literatury:

- 1) JANČÁŘ, Josef. Úvod do materiálového inženýrství polymerních kompozitů. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2003. ISBN 8021424435.
- 2) KOŘÍNEK, Zdeněk. KOMPOZITY – Ing. Zdenek Korinek, CSc [online]. Icit. 2014-05-17]. Dostupné z: <http://mujweb.cz/zkorinek/>
- 3) EHRENSTEIN, G. W.: Polymerní kompozitní materiály. 1. vyd., Scientia Praha 2009, s. 196. ISBN 978-80-86960-29-6.
- 4) Vědecké publikace dostupné v databázích knihovny UTB.

Vedoucí diplomové práce:

Ing. Simona Mrkvíčková, Ph.D.

Ústav inženýrství polymerů

Datum zadání diplomové práce:

2. ledna 2017

Termín odevzdání diplomové práce:

10. května 2017

Ve Zlíně dne 1. března 2017



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



doc. Ing. Tomáš Sedláček, Ph.D.
ředitel ústavu

Příjmení a jméno:TIKL TIROR.....

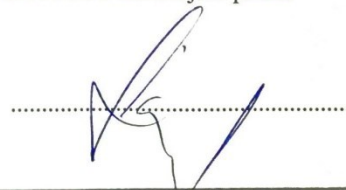
Obor:KCH5P1.....

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že

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

Ve Zlíně10.05.2017.....



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

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

(1) Škola nebo školské či vzdělávací zařízení mají za obvyklých podmínek právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla (§ 35 odst. 3). Odpírá-li autor takového díla udělit svolení bez vážného důvodu, mohou se tyto osoby domáhat nahrazení chybného 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 vynaložil, a to podle okolností až do jejich skutečné výše; přitom se přihlídí k výši výdělku dosaženého školou nebo školským či vzdělávacím zařízením z užití školního díla podle odstavce 1.

ABSTRAKT

Díly z kompozitních materiálů na bázi reaktoplastických pryskyřic, určených pro letecký průmysl jsou neustále vystavovány různým vnějším vlivům, které způsobují změnu jejich požadovaných uživatelských vlastností. Pro odvětví, ve kterém se používají, to může mít katastrofické následky. Cílem diplomové práce je příprava vzorků laminátů při různých teplotách a časech vytvrzování, které budou následně testovány na stupeň vytvrzení a budou hodnoceny jejich mechanické vlastnosti. Z výsledků se dá určit, při jakých hodnotách a časech vytvrzování, je materiál nejméně náchylný ke ztrátě požadovaných vlastností.

Klíčová slova: kompozit, laminování, teplota skelného přechodu, vytvrzení, mechanické vlastnosti

ABSTRACT

Parts of composite materials based on thermosetting resins intended for the aerospace industry are constantly exposed to various external influences that cause a change in their desired user characteristics. For the sector in which they are used, this can have catastrophic consequences. The aim of this diploma thesis is the preparation of laminate samples at different temperatures and curing times, which will subsequently be tested for the degree of cure and the mechanical properties will be evaluated. From the results it is possible to determine at what values and times of curing, the material is least prone to loss of the desired properties.

Keywords: composite lamination, glass transition temperature, curing, mechanical properties

Na tomto místě by jsem chtěl vyjádřit své poděkování především vedoucí diplomové práce Ing. Simoně Mrkvičkové, Ph.D. za veškerou pomoc, vedení, cenné rady a věnovaný čas. V neposlední řadě bych se chtěl poděkovat celé své rodině, přátelům a přítelkyni za jejich podporu.

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

Ve Zlíně2017

.....

Podpis

OBSAH

ÚVOD	11
I TEORETICKÁ ČÁST	12
1 HISTORIE	13
1.1 HISTORIE KOMPOZITŮ V LETECTVÍ	13
1.2 KOMPOZITY V LETECKÉM PRŮMYSLU SOUČASNOSTI	15
2 KOMPOZIT	17
2.1 ROZDĚLENÍ PODLE VELIKOSTI VÝZTUŽE	17
2.2 ROZDĚLENÍ PODLE STRUKTURY	18
2.3 MATRICE	18
2.3.1 Kompozity s matricí z termoplastu	19
2.3.2 Kompozity s matricí z termosetu	19
2.3.2.1 Polyesterové pryskyřice	20
2.3.2.2 Vinylesterové pryskyřice	20
2.3.2.3 Fenolové pryskyřice	20
2.3.2.4 Epoxidové pryskyřice	21
2.3.3 Vytvrzování pryskyřic	23
2.4 VÝZTUŽ.....	27
2.4.1 Částice	27
2.4.2 Vlákna	29
2.4.2.1 Kompozity s krátkými vlákny	29
2.4.2.2 Kompozity s dlouhými vlákny	30
2.4.3 Vlákna pro přípravu kompozitních materiálů	30
2.4.3.1 Skleněná vlákna	31
2.4.3.2 Uhlíková vlákna	32
2.4.3.3 Aramidové vlákna	34
2.4.3.4 Borové vlákna	35
2.4.4 Roviny a tkaniny	36
3 CHARAKTERISTIKA VRSTVENÝCH KOMPOZITŮ	38
3.1 ROZDĚLENÍ PODLE SLOŽENÍ.....	38
3.2 TECHNOLOGIE VÝROBY VRSTVENÝCH KOMPOZITŮ	39
3.2.1 Ruční kladení	39
3.2.2 Automatické kladení	40
3.2.3 Autokláv	41
3.2.4 Rotační navíjení	41
3.2.5 Pultruze	42
3.3 KOMPOZITY V LETECTVÍ	43
3.3.1 Vojenské letectví	43
3.3.2 Civilní letectví	43
3.3.3 Sportovní létání	44
4 STÁRNUTÍ KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ	45
4.1 DEGRADACE VLIVEM VNĚJŠÍHO PROSTŘEDÍ.....	45
4.1.1 Degradace vlivem kyslíku	45
4.1.2 Degradace vlivem ozonu	46
4.1.3 Degradace UV zářením	47

4.1.4	Degradace vlivem teploty	47
4.1.5	Degradace vlivem vlhkosti.....	48
4.2	DEGRADACE VLIVEM POUŽITÍ.....	48
4.2.1	Chemická degradace	49
4.2.2	Degradace mechanickým namáháním.....	49
4.3	HODNOCENÍ ŽIVOTNOSTI LETECKÝCH KONSTRUKCÍ	50
II	PRAKTICKÁ ČÁST	52
5	CÍLE DIPLOMOVÉ PRÁCE	53
6	POUŽITÉ MATERIÁLY	54
6.1	MATRICE.....	54
6.1.1	Epoxidová pryskyřice HAVEL L 285.....	54
6.1.2	Tvrdidlo HAVEL H 286	54
6.2	VÝZTUŽ.....	56
6.2.1	Skelná tkanina AEROGLASS.....	56
6.2.2	Aramid-uhlíková tkanina HYBRID	56
6.2.3	Jádro AIREX C70- 1,2 mm.....	57
6.3	FORMA	57
6.3.1	Separátor PARTAL HI-Temp Wax	58
6.3.2	Povrchová úprava.....	58
7	VÝROBA ZKUŠEBNÍCH TĚLES	59
7.1	POSTUP PŘI LAMINACI	59
7.1.1	Příprava formy	59
7.1.2	Příprava tkanin	59
7.1.3	Příprava epoxidové pryskyřice a tvrdidla	59
7.1.4	Proces ruční laminace	60
7.1.5	Vytvrzování vzorků.....	61
7.1.6	Dokončovací práce.....	62
7.2	PŘÍPRAVA ZKUŠEBNÍCH TĚLES.....	62
7.2.1	Podmínky vytvrzování	62
	Testovací desky byly připraveny podle následujících parametrů:	62
7.2.2	Příprava těles pro jednotlivé zkoušky	62
8	POUŽITÉ ANALÝZY A METODY MĚŘENÍ.....	63
8.1	TERMICKÉ ANALÝZY	63
8.1.1	Diferenční skenovací kalorimetrie (DSC).....	63
8.1.2	Dynamická mechanická analýza (DMA).....	64
8.2	SPEKTRÁLNÍ METODY	66
8.2.1	Infračervená spektroskopie s Fourierovou transformací FTIR.....	66
8.3	STATICKE KRÁTKODOBÉ ZKOUŠKY.....	67
8.3.1	Tahová zkouška.....	67
8.3.2	Ohybová zkouška	68
8.3.3	Zkouška tvrdosti.....	69
9	VÝSLEDKY A VYHODNOCENÍ MĚŘENÍ.....	71

9.1	VÝSLEDKY DSC.....	71
9.2	VÝSLEDKY DMA.....	77
9.3	VÝSLEDKY FTIR.....	79
9.4	VÝSLEDKY ZKOUŠKY OHYBEM.....	85
9.5	VÝSLEDKY ZKOUŠKY TVRDOSTI.....	88
	ZÁVĚR	90
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	92
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	95
	SEZNAM OBRÁZKŮ	98
	SEZNAM TABULEK.....	101
	SEZNAM PŘÍLOH.....	102

ÚVOD

Současná rostoucí poptávka na vlastnosti výrobků, vývoj vědy a techniky, stejně jako i vývoj jednotlivých oborů si vyžaduje rozvoj nových postupů a typů materiálů s vysokými parametry. Klasicky vyráběné materiály už zdaleka nevyhovují stále rostoucím požadavkům a to ve všech odvětvích průmyslu, zejména pak v dopravním průmyslu. Tlak na vývoj nových konstrukčních materiálů je proto tak naléhavý, neboť klasické způsoby zvyšování vlastností soustav jsou z technického hlediska jen těžko dosažitelné a z ekonomického velmi nákladné. Z tohoto důvodu je stále více upřednostňovaný rozvoj kompozitních materiálů, zejména pak s polymerní matricí.

Kompozity definujeme jako materiál, který se skládá z více složek, lišících se fyzikálními a chemickými vlastnostmi, které svým spojením tvoří kompaktní heterogenní soustavu. Vznikne nový materiál s novými specifickými vlastnostmi, které nemohou být dosaženy kteroukoliv složkou samostatně, dokonce vyššími než součet všech vlastností jednotlivých složek. Pevnost těchto materiálů dosahuje hodnot kovů a jejich elastické vlastnosti zase propůjčují materiálu velkou pružnost. V porovnání s běžnými materiály se polymerní kompozity vyznačují nejen výbornými mechanickými vlastnostmi, ale hlavně svojí nízkou hmotností a cenou, ku příkladu v leteckém průmyslu v porovnání s kovy jsou spolu s pevností, jedny z nejdůležitějších aspektů výběru použitých materiálů. Výroba a zpracování těchto materiálů pro použití v leteckém průmyslu, tak aby dosahovaly vysokých nároků na požadované vlastnosti je zejména v tomto odvětví dopravního průmyslu kladeno za prioritu.

Tato diplomová práce je zaměřena právě na materiály používané při výrobě dílů v leteckém průmyslu, konkrétně pro ultra lehké letouny, jejichž konstrukce je asi z 85 % tvořena právě těmito materiály. Téma bylo zpracováno na základě podnětu z firmy vyrábějící díly ultralightů z epoxidové pryskyřice. Jedná se konkrétně o kryt motoru. Tyto komponenty po nějaké době užívání ztrácí své původní vlastnosti, měknou. V rámci této diplomové práce byl ověřen postup, kterým jsou díly vyráběny z hlediska způsobu vytvrzování a dotvrzování. Byly připraveny vzorky s různými vytvrzovacími podmínkami a byl sledován stupeň konverze a mechanické vlastnosti.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 HISTORIE

Touha člověka létat je datována již od dob kdy člověk viděl ptáky létat a pokoušel se je napodobovat. Tato touha postupně vedla k vytvoření různých návrhů létajících křidel a strojů za použití nejrozmanitějších materiálů, až po dnešní vysoce výkonná letadla, která dokážou přepravovat stovky lidí najednou po celé zemi, nebo dokonce jsou schopny cestování mimo naši planetu, kde umožňují přežití lidí v nehostinných podmínkách vesmíru. Toto všechno je možné díky neustálému zdokonalování technologií a materiálů jako jsou například i kompozity.

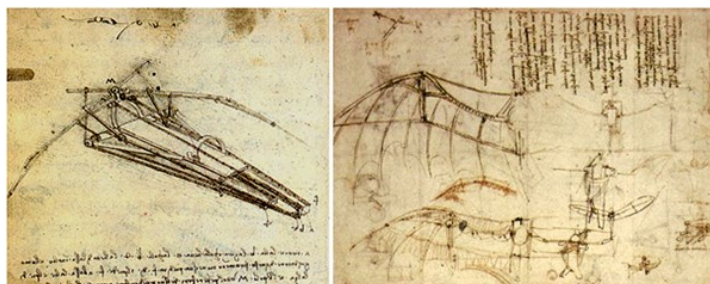
1.1 Historie kompozitů v letectví

Použití kompozitních materiálů v dávné minulosti není nic nového. Příkladem může být jejich nejzákladnější dochovaná použitelná forma, kdy je již před 10 tisíci lety před našim letopočtem, člověk využíval jako stavební materiál v podobě cihel z hlíny a slámy. Dalším příkladem kdy si člověk začal uvědomovat výhody těchto materiálů a začal využívat jejich sčítající se vlastnosti je mongolský luk, zkonstruovaný ze dřeva, kostí, šlach a kůže, kterého síla byla tak velká že již v době 1200 let před našim letopočtem byl jejich dostřel více jak 1500 metrů. Byl to základ pro současné “moderní kompozitní luky“. [9]

Využití kompozitních materiálů pro konstrukci létacích strojů:

- 1488 – Návrh ornitoptéry Leonarda da Vinci

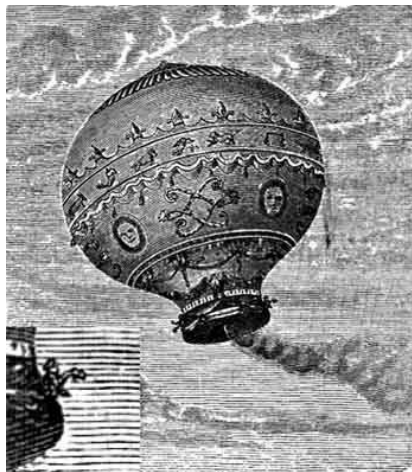
Navrhl několik létajících strojů včetně helikoptéry a rogalu, které i sestrojil a neúspěšně otestoval v roce 1496. Jeho konstrukce sestávala s dřevěné kostry a křidel potáhnutými textilií pro zvýšení odporu vzduchu. Tyto vynálezy během jeho života nikdy neletěly, ale jeho myšlenky byly základ pro další úspěšné návrhy. [1]



Obr. (1) Návrh létajících strojů Leonarda da Vinci [1]

- 1783 – Teplovzdušný balón bratrů Montgolfierových

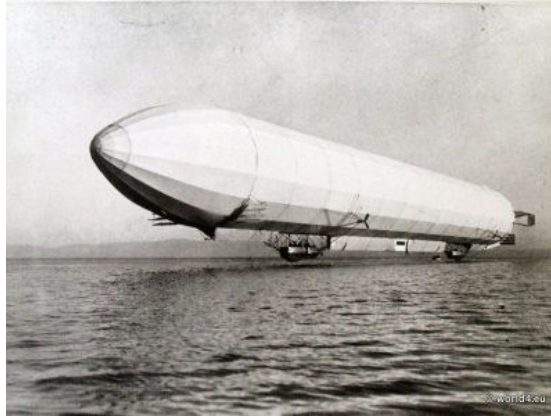
Jedná se o první evidovaný let kdy 5. května 1783 ve Francii, Joseph a Etienne Mongolfierovi, výrobci papíru, vypustili a úspěšně otestovali balón, který se vznesl do výšky skoro dvou kilometrů a do stejné vzdálenosti i doletěl. Jako první pasažéry byli ovce, kachna a slepice. Konstrukce pláště balónu byla zhotovena lepením z nastříhaných pasů hedvábí do tvaru koule s dřevěnou obručí při ústí balónu. [1,2]



Obr. (2) Teplovzdušný balón bratrů Montgolfierových [1]

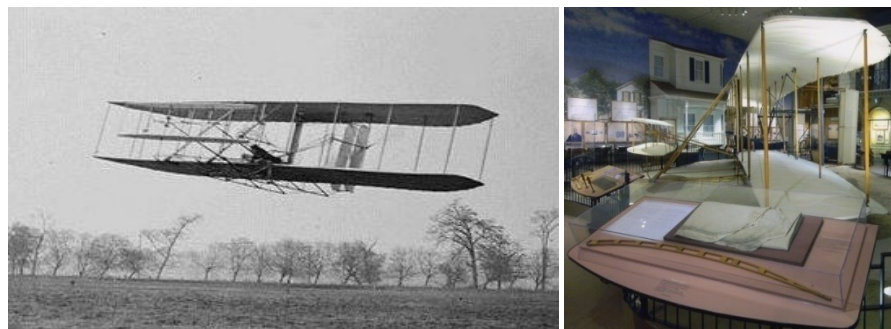
- 1900 – První let moderní vzducholodě- Ferdinand von Zeppelin

Ačkoli létání vzducholodí za použití pohonu, bylo poprvé uskutečněno 24. září 1852, kdy Francouzský hodinář Julese Henri Giffard vypustil svou vzducholod' poháněnou vlastnoručně vyrobeným parním strojem, byl to právě Zeppelin, který při konstrukci vzducholodě použil různé druhy materiálů a využil tak jejich různých vlastností. Vytvořil kompozitní konstrukci sestávající s hliníku, dřeva a textílie. [1,2]



Obr. (3) Konstrukce vzducholoď LZ 2 [1]

- 1903 – První let letounu bratrů Wrightových
17. prosince 1903 se uskutečnil první řízený let letounu, později nazývaného Flyer I, zkonstruovaného Orvillem a Wilburem Wrightovými. Kostra letounu byla zhotovena z dřevěných dílů vtužených dráty a konstrukce křídla lepena z odlehčených dřevěných žeber, potáhnutých textilií. Použitím těchto materiálů tak bylo dosaženo rovnováhy mezi pevností a lehkostí tolik potřebné pro letadlo. [2]

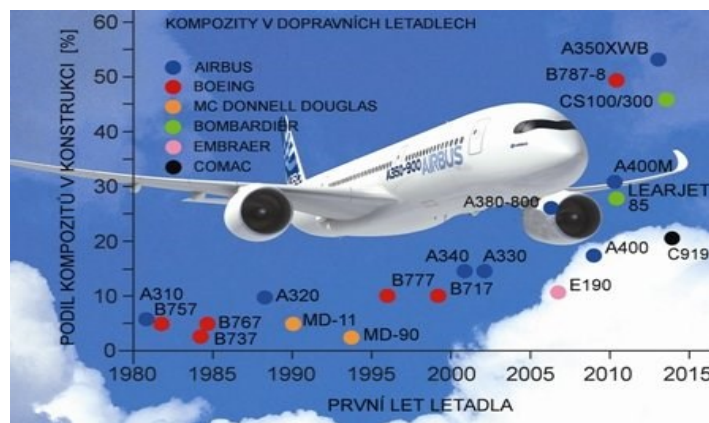


Obr. (4) Konstrukce letounu Flyer I [2]

1.2 Kompozity v leteckém průmyslu současnosti

Vývoj kompozitních materiálů pro použití v leteckém odvětví tak je známe dnes, byl zpočátku nákladný a potenciálně riskantní, proto prvotní vývoj byl proveden armádou, která měla poměrně velké rozpočty a neriskovala jako na civilní straně. Nicméně, tlak na výrobu odlehčených struktur byl ještě zesílen stoupající cenou ropy, změnou v postoji vůči otázkám životního prostředí (snížení emisí CO₂, NO_x, snížení vnímaného hluku) a předpokládaným nárůstem letecké dopravy, která se každých 15 let zdvojnásobuje.

Kompozitní materiály daly možnost vyrábět ultra-lehké konstrukce a tím snížit spotřebu paliva a pokles emisí. Náklady na jejich vývoj a zavedení těchto nových struktur do provozu je nyní kompenzováno ohromným ziskem, který jen za minulý rok činil až 36,3 miliardy dolarů. Nárůst těchto materiálů neustále roste a je stále více progresivní. V 70-tých letech byl podíl použitých vláknových kompozitů na dopravní letadla jenom 5 %, začátkem 90-tých let 10 % a na přelomu tisíciletí 15 %. V roce 2005 tento podíl vystoupal na 25 % a dnes přesahuje až 50 % všech použitých materiálů dnešních letounů. [3]



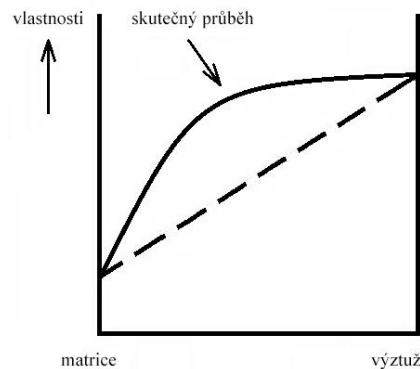
Obr. (5) Progresivní růst procentuálního využití kompozitů v konstrukcích dopravních letadel. [3]

Spolu s dosažením co nejnižší hmotnosti při vývoji leteckých konstrukcí je současně kladený důraz na co nejvyšší spolehlivost, využitím anizotropie epoxidových pryskyřic vyztužených uhlíkovými vlákny. Tímto spojením je dosaženo kooperujícího poměru mezi hmotností a mechanickými vlastnostmi. Použití uhlíkových vláken k vyztužení kompozitních materiálů předurčuje několik významných výhod, jako jsou závislé vlastnosti na směru uložení vláken, výborné mechanické vlastnosti, odolnost proti korozi, chemikáliím, hoření a nenáročnost technologie zpracování velkoplošných celků. Naopak mezi jejich nevýhody lze uvést vysoké nároky na výsledný produkt, v některých případech složité vytváření a závislou kvalitu. [2,3]

Využití termoplastů pro kompozitní materiály při konstrukci letadel je díky svým nedostatečným vlastnostem a vysokou cenou omezeno na použití pro menší díly a interiérové součásti (panely, sedadla). Toto omezení by mělo být do budoucna řešeno dalším technologickým a materiálovým vývojem. [7]

2 KOMPOZIT

Kompozit je materiál, který se skládá nejméně ze dvou látek pracujících společně, tak aby se vytvořili materiálové vlastnosti, které jsou odlišné od vlastností těchto látek samotných. V mnoha případech dosahují až synergického efektu, kdy výsledné vlastnosti jsou vyšší než pouhý součet vlastností jednotlivých látek dohromady. [4]



Obr. (6) Synergický efekt kompozitního materiálu [4]

Mezi složky z nichž kompozitní materiál je složen, patří matrice, zabezpečující spojitou fázi, která zároveň plní úlohu ochrany druhé nespojitě složky, výztuže. Stejně důležitým faktorem pro výsledné vlastnosti je také rozměr výztuže.

2.1 Rozdělení podle velikosti výztuže

V závislosti od rozměrů výztuže mají kompozitní materiály rozdílné vlastnosti a umožňují jejich využití v rozličných aplikacích. S poklesem rozměrů plniva, roste jejich aktivní povrch a materiál, tak získává lepší mechanické vlastnosti. [5]

- Makrokompozity

Rozměr výztuže těchto materiálů dosahuje v průměru 10^0 až 10^2 mm. Jejich použití je využíváno zejména ve stavebnictví, jako zpevňujících ocelových lan v betonových konstrukcích, pilířích a komunikacích. Do polymerních hmot jsou kromě využití jejich zpevňujících účinků, přidávány hlavně se záměrem jejich zlevnění. [4,5]

- Mikrokompozity

Příčný rozměr mikrokompozitů je v rozsahu 10^0 až 10^2 μm . Jejich zastoupení v kompozitních materiálech má největší význam. Využívají se ve všech odvětvích průmyslu, zejména pro laminátové aplikace ve formě vláken a tkanin konstrukčních polymerních výrobků. Můžeme je najít ku příkladu ve zdravotnictví, jako umělé náhrady končetin, pou-

žívají se pro výrobu sportovního nářadí a ochranných prvků, v dopravním průmyslu, ale hlavně při konstrukci dílů v leteckém odvětví. [4,5]

- Nanokompozity

Jsou relativně novou komoditou na poli kompozitních materiálů, a však jejich použitím se dosahuje nejvyšších vlastností z pohledu jak mechanických tak fyzikálních. Důvodem je, že s rozměrem roste i pravděpodobnost výskytu strukturních vad, a proto klesá i jejich pevnost. Rozměr těchto částic, který je řádově v nm, tak minimalizuje vznik podobných chyb v materiálu a činí výrobky z těchto plniv mnohonásobně odolnější, houževnatější a lehčí. Použití těchto materiálů je zejména z důvodů aktivních, kde se využívá jejich tepelně vodivých, elektrických a magnetických vlastností v odvětví elektroniky na výrobu různých elektronických součástek. [4,5]

2.2 Rozdělení podle struktury

V případě potřeby zesílení materiálů, například v obalové technice pro lepší výsledné vlastnosti je možná modifikace struktury vrstvením. Z tohoto hlediska kompozity rozdělujeme:

- Jednovrstvové kompozity

Jedná se pouze o jednu základní vrstvu, která zabezpečuje veškeré vlastnosti.

- Vrstvené kompozity

Vznikají složením více vrstev na sebe. Využívají se k zabezpečení vyšší pevnosti, odolnosti vůči opotřebení, nebo zlepšení odolnosti korozi. [5]

2.3 Matrice

Její úlohou je prosytit systém výztuže, do té míry, aby výsledný materiál byl tvarově stálý, aby bylo zabezpečeno geometrické uložení výztuže, poskytnutí dostatečné ochrany proti vlivům vnějšího prostředí, nebo mechanického poškození, pro co nejlepší přenos sil a namáhání. Podle použité matrice rozdělujeme kompozity:

- s polymerní matricí
- s kovovou matricí
- se skleněnou matricí
- s keramickou matricí

Kompozitní materiály s polymerní matricí jsou běžně používány v mnoha různých aplikacích. Skoro většinou se však jedná o matrici na bázi termosetu. Poměrně nedávno se intenzivněji rozšířilo použití termoplastu na matrici pro poměrně složité a sofistikované díly, určené pro primární letecké aplikace. [4,6,8]

2.3.1 Kompozity s matricí z termoplastu

Matrice je tvořena strukturou dlouhých makromolekul, které při překročení teploty skelného přechodu T_g začnou vykazovat visko-elastické chování a při dosažení teploty tání T_m se rozbalí a chovají se jako kapalina. Tento jev je opakovatelný. [7]

Prvním používaným termoplastem, který splňoval vyšší termomechanické charakteristiky jako matrice kompozitu je Polyetereterketon PEEK. Vznikl v 80tých letech, jako náhrada za termosety. Jeho výroba je však velmi nákladná a obtížná, proto se používá jen pro vojenské letouny. Dalším používaným termoplastem je Polyeterimid (PEI), který se vyznačuje výbornými mechanickými vlastnostmi, ale je náchylný na korozi, způsobenou nižší chemickou odolností. Jako výbornou alternativou co se týče zpracování a vlastností byl vyvinut Polyfenylensulfid (PPS), který se současně řadí za jeden z nejdražších komerčních termoplastů. Mezi nejnovější přírůstky používaných materiálů s výbornými termomechanickými charakteristikami při dobré zpracovatelnosti je Polyeterketonketon (PEKK). [7]

Typ pojiva	Značení	Teplota skelného přechodu	Teplota tavení	Teplota zpracování	Typ morfologie
		°C	°C	°C	
Polyfenylensulfid	PPS	88	285	329-343	Semikrystalický
Polyeterimid	PEI	218	--	316-360	Amorfní
Polyetereterketon	PEEK	143	345	382-399	Semikrystalický
Polyeterketonketon	PEKK	156	310	327-360	Semikrystalický

Tab. (1) Porovnání termoplastických matric pro letecké aplikace [17]

2.3.2 Kompozity s matricí z termosetu

Při vytvrzování dochází k chemické reakci, jejíž příčinou se vytváří trojrozměrná síť, která je po vytvrzení netavitelná a netvarovatelná. Vznik síťové struktury je pak příčinou větší tepelné a rozměrové stability a velké odolnosti vůči chemikáliím. Za předpokladu

že je alespoň jedna složka účastníci se reakce má funkčnost větší než dvě, k sesíťování dochází následovnými reakcemi:

- síťující polymerací monomeru,
- spojováním reaktivních konců oligomerických řetězců,
- síťováním existujících primárních řetězců.

2.3.2.1 Polyesterové pryskyřice

Jsou na prvním místě jako hlavní složka při výrobě kompozitních materiálů pro stavební a konstrukční účely, používají se i pro výrobu forem, spoilerů a jiných běžných kompozitů. [8,9]

Připravují se reakcí dikarbonových kyselin (například fumarová, ftalová, adipová) s glykoly (například propylenglykolu). Použitím konkrétních kyselin se určují výsledné vlastnosti pryskyřic. Na příklad použití kyseliny orto-ftalové zlepšuje chemickou odolnost a zpracovatelské vlastnosti, nebo při použití tereftalové kyseliny, dostaneme kompozity dobré jakosti, schopné odolat hydrolyze. [8,9]

Ve všeobecnosti se vyznačují vysokou pevností, vynikajícími izolačními vlastnostmi, odolností proti opotřebení a dobrou chemickou odolností. Jejich největší výhodou v kooperaci s uvedenými vlastnostmi je cena, která je v porovnání s epoxidovými pryskyřicemi 5 až 6 krát nižší. Jejich nevýhodou je naopak větší smrštění, které je oproti epoxidovým pryskyřicím 5 až 9 %, mají špatnou hydrolytickou stabilitu a nižší chemickou odolnost při zvýšení teploty. Nutné je též zmínit jejich negativní vliv na životní prostředí v důsledku působení styrenu. [8,9]

2.3.2.2 Vinylesterové pryskyřice

Oproti polyesterovým pryskyřicím mají lepší vlastnosti, co se týče houževnatosti a lepší chemické odolnosti (korozivní prostředí). Jejich použití je rovněž velmi široké, používají se pro výrobu nádrží, potrubí, částí automobilů, lodí, komínů a díky pevnosti těchto pryskyřic i pro výrobu velkých nosných konstrukčních profilů. [9,10]

2.3.2.3 Fenolové pryskyřice

Jsou to nejstarší termosetové pryskyřice (bakelit). Vyrábí se polykondenzací fenolu a formaldehydu, nebo vyšších aldehydů a substituovaných fenolů. Vyznačují se dobrou odolností vůči povětrnostním podmínkám, izolačními vlastnostmi, odolnost plamene, malý

vývin kouře a dobrými mechanickými vlastnostmi. Jejich nedostatkem je malá houževnatost vytvrzených kondenzátů.

Používají se jako lisovací hmoty a díky své odolnosti proti hoření, jako konstrukční panely pro různé aplikace v dopravním průmyslu. [9,11]

2.3.2.4 Epoxidové pryskyřice

Patří mezi nejpoužívanější látky pro matrice vyztužených kompozitních materiálů nejen v odvětví letectví, ale hodně se využívají také na aplikace v elektronice, sportovních potřebách, automobilovém průmyslu a jako odolná lepidla, nebo nátěry. [10]

V nezesíťovaném stavu je epoxidová pryskyřice kapalina, obsahující molekuly s více funkčními epoxidovými skupinami, která spolu s tvrdidlem obsahujícím vodíkové ionty navzájem reagují a vytváří trojrozměrnou síť. Při této reakci reaguje vždy jedna molekula tvrdidla s jednou molekulou pryskyřice, to znamená, že velká většina reakcí proběhne bez zvýšení viskozity a výraznějšího zvětšení molekuly, což je spojené s reakčním smrštěním. Díky tomu, že hlavním mechanismem epoxidových pryskyřic je polyadice, nedochází k odštěpení vedlejších produktů a smrštění je jen 2 až 5 %. Podíl epoxidové pryskyřice a tvrdidla, stejně jako druh tvrdidla, určují průběh vytvrzování a výsledné vlastnosti vytvrzeného materiálu. [8,9]

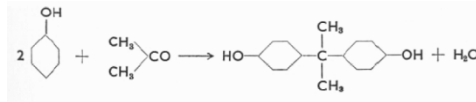
Mezi nejvýznamnější vlastnosti těchto materiálů patří již zmiňovaná nízká tepelná roztažnost, jejich tvarová stálost za tepla, odolnost vnějšího prostředí a UV záření, dobrá adheze k různým druhům materiálů, dobré fyzikální vlastnosti, odolnost vůči chemikáliím a možnost kontroly procesu vytvrzování. Jejich výsledné vlastnosti je ještě možné modifikovat ku příkladu přidávkem kaučuku, čím docílíme zvýšení houževnatosti. Naopak mezi jejich největší nevýhody patří jejich vysoká cena. Právě proto se kompozity s epoxidovou matricí používají jen pro vybrané aplikace. Jako levnější alternativa těchto matric se používají polyesterové pryskyřice. [8,9]

Příprava epoxidových pryskyřic

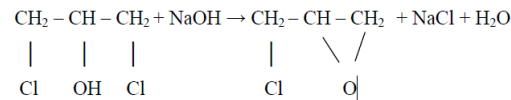
Mezi nejběžnější epoxidové pryskyřice se používají epoxidy na bázi bisfenolu A, nebo na bázi aromatických aminů a novolaků.

- Dian (bisfenol A), jeho příprava spočívá v kondenzaci acetonu a fenolu v kyselém katalyzátoru (H_2SO_4 anebo HCl). Průběh reakce je exotermní za zvýšené teploty.

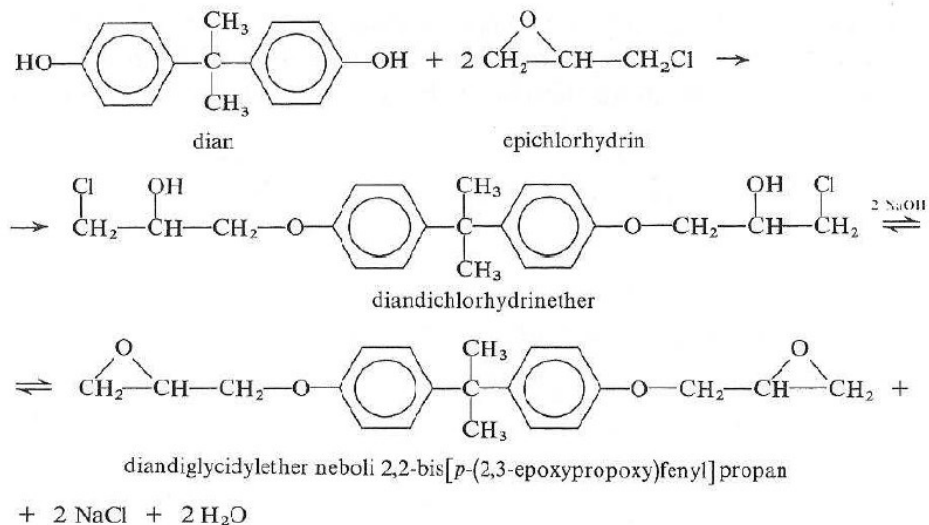
Následně po syntetizaci jeho nutné čistit pomocí krystalizace v rozpouštědle a sušit. Takto připravený dian má bod tání 157 °C.



- Epichlorhydrin, vyrábí se z propenu, kdy se vlivem chloru kyseliny chlorné získá dichlorhydrin a následným působením alkálií se převede na epichlorhydrin.

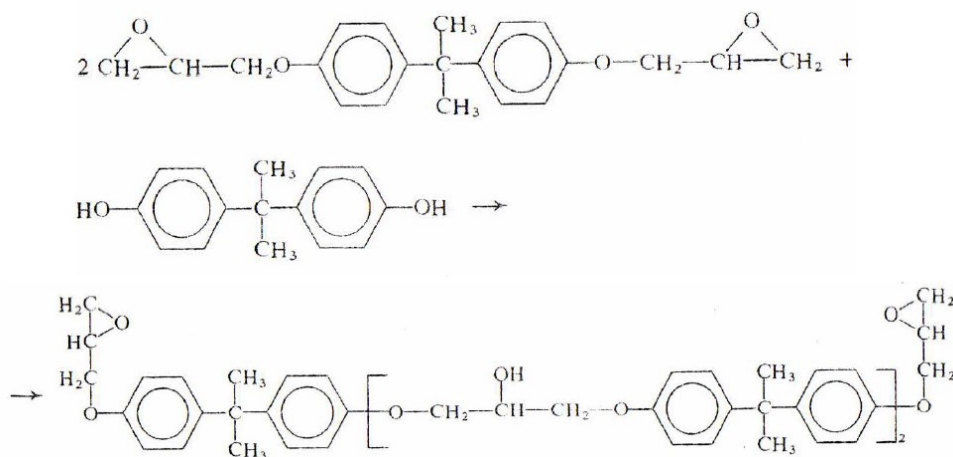


Epoxidové pryskyřice se nejčastěji se připravují alkalickou kondenzací 2,2-bis-p-hydroxyfenylpropanu (bisfenol A) s epichlorhydrinem. V průběhu kondenzace probíhají dvě reakce: 1. adice epoxidových skupin epichlorhydrinu na fenolický hydroxyl za přítomnosti alkálií a 2. odštěpení chlorovodíku ze vzniklých chlorhydrinetherů za vzniku epoxidových skupin. [9,10]



Obr. (7) Mechanismus reakce vzniku epoxidových pryskyřic [10]

Vytvořená epoxidová skupina zůstává zachována, nebo může dále reagovat s dalšími molekulami fenolového hydroxyly za vzniku výšemolekulární látky, nebo může kromě hlavní reakce probíhat ještě vedlejší, ku příkladu částečná hydrolyza vodou na dioly.



Obr. (7) Mechanismus další reakce epoxidové skupiny s fenolickým hydroxylem [10]

2.3.3 Vytvrzování pryskyřic

Je to proces chemických reakcí, jehož výsledkem je změna kapalně látky na pevnou za vytvoření trojrozměrné sítě. Tato látka je následně netvarovatelná a netavitelná. Jedná se o reakce exotermické, proto při síťování dochází k vývinu tepla, které tyto reakce ještě urychluje. Po jejich ukončení ještě nejsou zreagované všechny dvojně vazby a pro úplné dotvrzení je nutné teplo dodat. Množství uvolněného a potřebného tepla k celkovému vytvrzení, jako i doba, za kterou materiál zesílňuje je daná druhem pryskyřice, použitým tvrdidlem, aditivech a v neposlední řadě teplotou při které reakce probíhá. [9,10]

Přechod mezi kapalným a pevným skupenstvím je nazývaný též jako proces želatinace a je určený 3 body:

- bodem gelace, kdy vzniká první molekula již nerozpustná v rozpouštědle,
- dobou gelace, určuje čas přechodu, využívá se v praxi,
- dobou zpracování, popisující dobu zpracování po smísení složek.

Ukončení procesu vytvrzení pryskyřice, určuje zreagování všech reaktivních skupin nacházejících se v systému. Jeho ukončení je těžké určit, protože nemáme metody přímého vyhodnocení. Z tohoto důvodu se stupeň vytvrzení vypočte na příklad z měření na diferenciální snímací kalorimetrii (DSC), jako poměr uvolněného tepla v čase t a celkového uvolněného tepla reakce. [11]

$$SV_{DSC} = \frac{\Delta H_t}{\Delta H_{celk}} \quad (1)$$

kde

SV_{DSC} – stupeň vytvrzení určený DSC

ΔH_t – uvolněné teplo v čase t

ΔH_{celk} – celkové uvolněné teplo reakce

Pro určení stupně konverze (množství zreagované látky) a rychlost této reakce se používají čtyři metody v závislosti od izotermického a dynamického měření:

Metoda I.

K určení se využívá izotermní sken, za předpokladu zaznamenání všeho tepla v průběhu reakce. Celkové teplo reakce může být stanoveno z rozdílu entalpie za předpokladu vyšších teplot než teplota vytvrzení směsi, aby došlo k úplnému dotvrzení.

Stupeň konverze α a rychlost reakce da/dt se vypočítá dle:

$$\alpha = \frac{\Delta H_t}{\Delta H_{ISO}} \quad (2)$$

$$\frac{d\alpha}{dt} = \frac{(dH/dt)}{\Delta H_{ISO}} \quad (3)$$

kde ΔH_{ISO} je celkové uvolněné teplo při izotermním skenu.

Metoda II.

Používá se v případě, že je po izotermním měření provedeno ještě dynamické do vysoké teploty. V případě, že je tímto měřením získáno ještě zbytkové (residuální) teplo ΔH_{res} , znamená to, že celkové teplo ΔH_{ISO} získané při izotermním skenu není celkové a jeho hodnotu pak získáme součtem těchto dvou tepel.

Stupeň konverze α a rychlost reakce da/dt se vypočítá dle:

$$\alpha = \frac{\Delta H_t}{\Delta H_{ISO} + \Delta H_{res}} \quad (4)$$

$$\frac{d\alpha}{dt} = \frac{(dH/dt)}{\Delta H_{ISO} + \Delta H_{res}} \quad (5)$$

Metoda III.

Tato metoda se použije, je-li součet celkového tepla izotermního skenu a residuálního tepla následného dynamického skenu menší než teplo naměřené pro stejnou reakci v dynamickém měření ΔH_{DYN} , které je považováno za celkové teplo reakce.

Stupeň konverze α a rychlost reakce $d\alpha/dt$ se vypočítá dle:

$$\alpha = \frac{\Delta H_t}{\Delta H_{\text{DYN}}} \quad (6)$$

$$\frac{d\alpha}{dt} = \frac{(dH/dt)}{\Delta H_{\text{DYN}}} \quad (7)$$

Metoda IV.

V případě, že součet reakčního tepla naměřený při izotermním měření (I.) a zbytkového tepla při následném dynamickém skenu je menší, než teplo naměřené metodou III., znamená to, že jedno z měření je chybně určeno, protože jejich hodnoty by měli být stejné. Tento nesoulad by mohl být způsobený ztrátou tepla vlivem ustalování DSC při započetí měření, nebo nezaregistrováním části tepla izotermního skenu z důvodů jeho citlivosti. V této situaci budeme jako celkové teplo reakce brát hodnotu získanou při dynamickém měření a ΔH_t a $(\Delta H/dt)_t$ budou korigovány vzhledem k nezaregistrované části tepla.

$$\alpha = \frac{\Delta H_t (\Delta H_{\text{DYN}} - \Delta H_{\text{res}})}{\Delta H_{\text{ISO}} + \Delta H_{\text{DYN}}} \quad (8)$$

$$\frac{d\alpha}{dt} = \frac{\left(\frac{\Delta H}{dt}\right)_t (\Delta H_{\text{DYN}} - \Delta H_{\text{res}})}{\Delta H_{\text{ISO}} + \Delta H_{\text{DYN}}} \quad (9)$$

Nedostatečné vytvrzení je příčinou poklesu výsledných vlastností materiálu. Kompozitu v tomto stavu je náchylnější vlivům vnějšího prostředí, ztrácí odolnost vůči chemickým vlivům a zhoršují se i jeho mechanické vlastnosti. V případě, že by materiál nebyl dotvrzený, mohlo by též dojít k jeho svévolnému dotvrzení a materiál by se zdeformoval. [9,11]

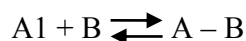
Důležitým ukazatelem stupně vytvrzení je též hodnota teploty skelného přechodu T_g , která s rostoucí konverzí stoupá až po dosažení maximální hodnoty. Její hodnotu lze stanovit pomocí metody DSC nebo DMA.

Mezi další možnosti určení vytvrzení může být použita metoda porovnání mechanických hodnot modulu naměřených při úplném vytvrzení ($E_{100\%}$).

$$E_{\text{norm}} = \frac{E_{\text{vzorku}}}{E_{100\%}} \quad (10)$$

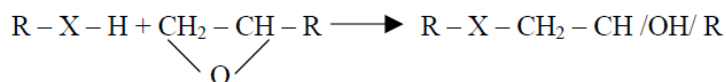
Chemie vytvrzování epoxidových pryskyřic

Všeobecním znakem chemické reakce epoxidových skupin je jejich iontový charakter v důsledku čeho při vytvrzení s látkami obsahujícími volný elektronový pár dochází k vytvoření vazby.



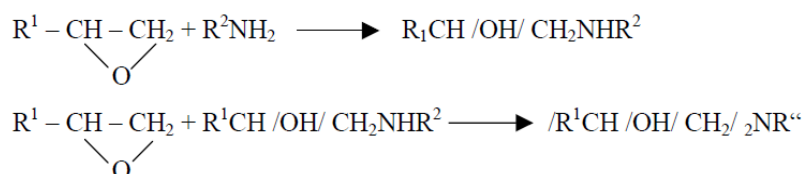
Tvrdidla epoxidových pryskyřic

Podle charakteru reakce je rozdělujeme na polymerační a polyadiční obsahující reaktivní vodík, který se během reakce naváže na epoxidový kyslík za vzniku OH skupiny, na kterou se připojí zbytek molekuly po odštěpení vodíku.



Mezi polyadiční tvrdidla patří například: polyaminy, polyamidy, polykyseliny, polysulfidy, polyfenoly, dikyandiamidy a anhydridy.

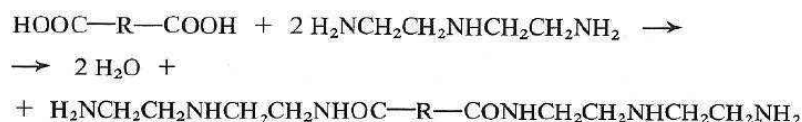
Polyaminy: reakce, při níž v první fázi vzniká sekundární amin s hydroxylovou skupinou k dusíku a následně reaguje s další epoxidovou skupinou za vzniku terciálního aminu.



Důležitým prvkem pro vznik sesíťované struktury je, aby použitý amin obsahoval aspoň 3 aktivní atomy vodíku. Mezi nejčastěji používané polyaminy patří:

- Diethylenamin
- Dipropylentriamin
- Triethylentriamin
- Isoforondiamin

Polyaminoamidy: Používají se hlavně pro dvousložková lepidla, nátěrové hmoty a tmely. V porovnání s alifatickými polyaminy jsou houževnatější, ale méně odolné vůči kyselinám a rozpouštědlům. Porovnání schopné polyaminoamidy s alifatickými polyaminy jsou připravované společnou reakcí dimerních mastných kyselin a alifatických polyaminů za společného zahřívání na 200 °C. [9,10,11]



Obr (8) Reakce dimerních mastných kyselin s alifatickými polyamidy

Aromatické polyaminy: v porovnání s alifatickými polyaminy se produkty vytvrzené aromatickými aminy vyznačují vyššími pevnostními charakteristikami, lepší tepelnou a chemickou odolností, dlouhou životností a tvarovou stálostí. [10,11]

Nejčastěji používaná tvrdidla na bázi aromatických polyaminů jsou:

- m- fenylendiamin
- 4,4-diaminodifenylmethan
- 4,4- diaminodifenylsulfon

2.4 Výztuž

Úlohou výztuže (zpevňující složky) je prioritně zabezpečení mechanických vlastností kompozitních materiálů, ku příkladu pevnost, tuhost a pružnost. Nicméně ovlivňuje i jejich fyzikální vlastnosti, kterých využíváme pro teplotní, izolační, nebo elektrické aplikace. Dobrý přenos sil a tedy mechanické vlastnosti kompozitu jsou závislé zejména od adheze zpevňující složky k matici, tvaru zpevňující složky a jeho obsahu, který v případě nanoplňiv dosahuje jen několik hmotnostních procent (3-5% hm.) a v případě vláken může dosahovat až 80-85 % hm. [12]

2.4.1 Částice

Tvar těchto výztuh je převážně osově souměrný a ani jeden rozměr částice nepřevyšuje nad ostatními. Přispívají k zlepšení přenosu napětí z matrice, tepelné odolnosti, zvýšení tuhosti a zlepšuje zpracovatelnost při obrábění. Z hlediska tvaru je pak ještě dělíme na:

Sférická geometrie částic

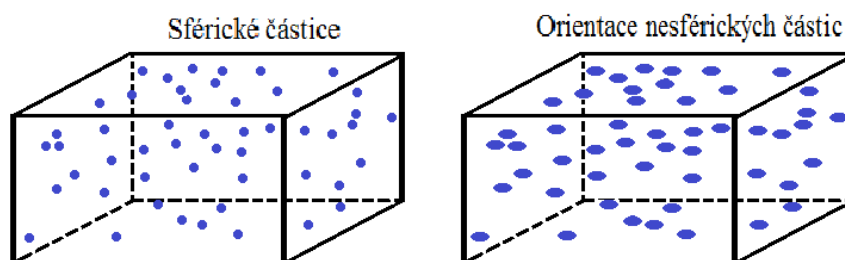
- kuličky: využíváné také díky svým reologickým vlastnostem, ke snížení viskozity licích hmot. Vyrábí se zejména z oxidu křemičitého, jako duté částice, které díky své nízké hustotě snižuje i hustotu celého kompozitního materiálu a zvyšuje jeho specifický modul, nebo jako plné částice, které hustotu sice zvyšují, ale umožňují zpracování použitím vyšších tlaků (lisování). [4,13]

Nesférická geometrie částic

- vločky a destičky: nejčastěji se používají slídové a jílové materiály. Tvoří je malé vrstevnaté tenkostěnné částice, jako levná a efektivní výztuž, která díky svému protáhlému tvaru snižuje smrštění a při ukládání přes sebe dochází k bariérovému efektu, který se uplatňuje jako plynu nepropustný a antikorozi mechanismus. Díky svému tvaru snadno kloužou po jiném povrchu, proto se používají i jako lubrikanty pro pryž a plasty. [13]
- whiskery: jsou to monokrystaly, jejich průřez je často tvořený hrany s velkým povrchem, v závislosti od krystalické struktury. V kompozitu se většinou používají v kombinaci s vlákny, ale mohou být použity i samostatně. Dosahují vysoké specifické pevnost v tahu, dokonce u nich byla objevena supravodivost, ale náklady na jejich výrobu i náročnost samotné výroby je tak vysoká, že se používají jen pro speciální aplikace. [13]

Orientace částic

Orientace v kompozitním materiálu při sférických částicích nemá z pohledu geometrie při přenosu napětí velký význam, protože má ve všech směrech stejnou hodnotu. Významu nabývá až při částicích s nepravidelnou geometrií, které určují přenos napětí v závislosti od jejich povrchu a směrování částice. Materiál tak dosahuje lepších výsledných vlastností. [4,8,13]



Obr. (9) Znázornění sférické a nesférické orientace částic v matrici [14]

Dispergace částicových plniv

Důvodem dispergace plniv v kompozitu je zamezit vznik defektů, takzvaných koncentrátorů napětí, které mohou být způsobeny velkými primárními částicemi plniva nebo vzniklými agregáty malých částic. Cílem tedy je dosažení co nejrovnoměrnějšího rozložení plniva v kompozitu. [4,13]

2.4.2 Vlákna

Patří mezi nejpoužívanější a nejpevnější výztuže kompozitních materiálů, které si od svého zavedení do výroby (1930-1940), zachovávají prvenství nejen v oblasti využití, ale i v oblasti vývoje vláken a technologií jejich výroby. Pevnost vláken je běžně o jeden až 2 řády vyšší než matrice. Přenášejí napětí zatěžující kompozitní materiál, vytvářením smykových sil na mezifázovém rozhraní vlákno-matrice. Díky tomu je tak matrice téměř bez napětí. [15]

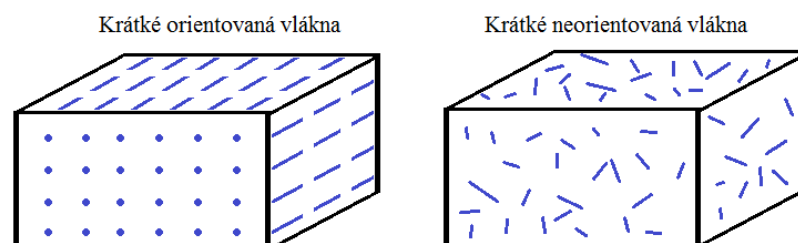
2.4.2.1 Kompozity s krátkými vlákny

Používají se zejména pro vstříkované, nebo extrudované polymerní výrobky.

Jsou charakterizované poměrem délky k průměru: $L / D < 100$.

Orientace krátkých vláken

Jejich orientaci lze řídit jen těžko. Ve většině případů výroby, jsou uspořádány nahodile, výjimkou jsou některé technologické výrobní postupy, které orientaci vláken v matrici ovlivňují a tím tak dosahují lepších výsledných vlastností výrobku. Příkladem takového zpracování je vstříkování, nebo vytlačování. [4,15]



Obr. (10) Znázornění orientace krátkých vláken v matrici. [14]

2.4.2.2 Kompozity s dlouhými vlákny

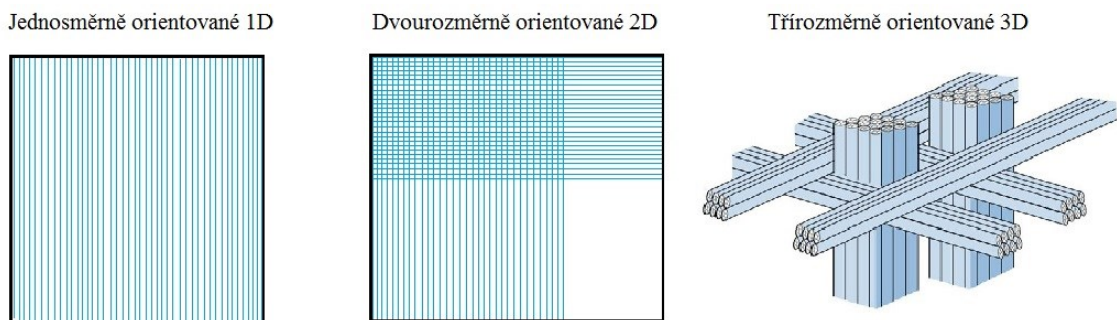
Jejich využití se uplatňuje při rozměrných konstrukcích, jako jsou trupy letadel a lodí, tlakové nádoby a různé velkoplošné díly. Vlákna mohou přecházet kontinuálně přes celý výrobek a tím absorbovat veškeré zatížení podél celého kompozitu. [15]

Jsou charakterizované poměrem délky k průměru: $L / D > 100$

Orientace dlouhých vláken

Patří mezi významné faktory ovlivňující vlastnosti těchto kompozitů. Je rozhodující nejen ve výsledných aplikacích, ale i pro výběr vhodné metody zpracování. Se stoupajícími požadavky na orientaci vláken v materiálu, roste i náročnost technologie, pro jeho výrobu. Proto při určování výsledných vlastností je nutné specifikovat zamýšlený způsob a směr namáhání. Uložením vláken v konkrétním směru, měníme pevnost a tuhost celého kompozitního materiálu, to nám dává možnost variability. Podle geometrie systému je teda rozdělujeme:

- jednosměrná kontinuální fáze (vlákna),
- dvourozměrná kontinuální fáze (rovingy, rohože),
- tří rozměrná kontinuální fáze (pleteniny, tkaniny). [4,8,15]



Obr. (11) Rozdělení geometrie dlouhých vláken [14]

2.4.3 Vlákna pro přípravu kompozitních materiálů

Výběr vhodného vlákna z hlediska docílení požadovaných vlastností na celek systému je velmi důležitý. Pro jejich dosažení je nutné, aby vlákna splňovali tři základní požadavky:

- pevnost vlákna musí být vyšší než matrice:

$$\sigma_f > \sigma_m$$

kde σ_f je pevnost vlákna a σ_m je pevnost matrice

- hustota vlákna musí být vyšší než hustota matrice:

$$E_f > E_m$$

kde E_f je modul pružnosti vlákna a E_m je modul pružnosti matrice

- porucha vlákna musí nastat dříve než matrice:

$$\varepsilon_f > \varepsilon_m$$

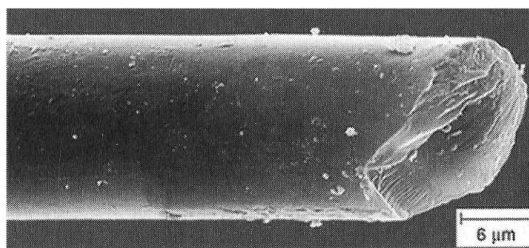
kde ε_f je prodloužení vlákna a je ε_m prodloužení matrice [15,16]

2.4.3.1 Skleněná vlákna

Mají dominantní postavení na trhu v používání vláken. Důvodem je okrem vynikajících mechanických a fyzikálních vlastností i jejich ekonomická dostupnost. Jsou amorfni s pravidelným kruhovým tvarem o průměru 3,5 až 24 μm . Vyznačují se vysokou pevností a velmi dobrou chemickou, tepelnou i elektrickou odolností. Naopak k jejich nevyhovujícím vlastnostem patří slabá adheze k matrici, nízký modul pružnosti a vysoká hustota. [16]

Výroba skleněných vláken

Vyrábí se ve sklářské peci, tažením sklovité taveniny přes množství platinových trysek (2000-4000). Tažené vlákno má po opuštění trysky průměr 1-2 mm, proto se za pomoci rychlého odtahu vlákna ještě dluží a kalibruje na svůj požadovaný průměr. Zároveň se na něj ještě před navíjením nanáší lubrikační roztok, kterého úkolem je spojit jednotlivá vlákna, chránit jejich povrch proti poškození a zlepšit následnou adhezi k matrici při zpracování. [16]



Obr. (12) struktura skleněného vlákna [11]

Typy skleněných vláken

Výsledné vlastnosti vláken jsou závislé od obsahu příměsí v tavenině, na základě čeho je dělíme:

- E sklo, v průmyslu nejběžněji používané. Vyrábí se roztavením křemičitého písku (SiO_2), vápence (CaCO_3), Kaolinu ($\text{Al}_4[\text{Si}_4\text{O}_{10}](\text{OH})_8$), dolomitu ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$), kyseliny borité ($\text{B}(\text{OH})_3$) a kazivce (CaF_2). Jsou vynikajícím elektrickým izolantem, proto se označují i jako *elektrická*.
- C skla, mají vysoký obsah alkalických kovů a vyznačují se vysokou odolností proti korozi a kyselinám.
- S sklo, oproti ostatním E a C sklu má vyšší podíl oxidu křemičitého (SiO_2), oxidu hořečnatého (MgO) a oxidu hlinitého (Al_2O_3), co mu dodává vyšší pevnost. Je vhodný pro aplikace v leteckém průmyslu. [11,16]

2.4.3.2 Uhlíková vlákna

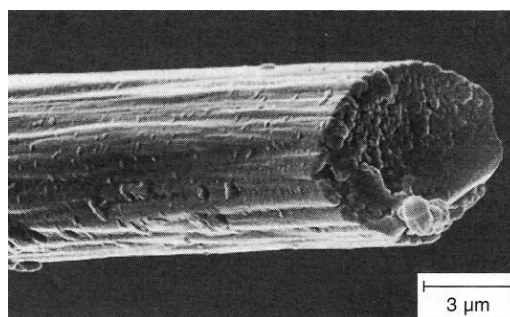
Kompozitní materiály vyztužené uhlíkovými vlákny, patří mezi nejpevnější. Jejich průměr je 5 až 10 μm . Poskytují materiálu větší pevnost a tuhost než ostatní vlákna, vyznačují se nízkou hustotou, odolností proti korozi a elektrickou vodivostí, která stoupá s teplotou. Zároveň se ale řadí mezi jedny z nejdražších, i když se náklady na jejich výrobu neustále vlivem vývoje nových procesů snižují. Ročně se vyprodukuje, až 45 tisíc tun těchto vláken z čeho je až jedna třetina použita pro aplikace v leteckém odvětví. [16,17]

Výroba uhlíkových vláken

Celý postup výroby se skládá z pěti fází:

- Příprava prekurzoru
Cílem je dosáhnout úpravu reaktantu (zvlákněním) na požadovanou jemnost. Jako základ pro prekurzor vláken se používají tři materiály:
 - polyakrylonitril (PAN) používaný od 1980, jejich využití je asi 90 % z celkového použití při výrobě. Vyprodukovaná vlákna jsou zařazována za standardní.
 - smola, surovinou pro přípravu jsou ropné smoly. Výsledné vlastnosti vláken vykazují vyšší pružnost a lepší tepelnou vodivost.
 - celulóza, byla použita jako první prekurzor výroby uhlíkových vláken. Jejich nevýhodou je velké množství vznikajícího odpadu, proto se v současnosti používá už jen minimálně.

- Stabilizace
Vlákno je za přístupu vzduchu a pod napětím zahříváno na teplotu 200 až 300 °C během čeho dochází k proměně cyklických nitrilových skupin na žebříkové.
- Karbonizace
Při karbonizaci dochází k proměně prekurzoru na uhlíkové vlákno s výsledným obsahem uhlíku 85 až 95 %. Toto se děje v inertní atmosféře při teplotě 900 až 1500 °C. Při této teplotě se z řetězce odstraní vodík a poklesne obsah kyslíku a dusíku. Vzniklá vlákna označujeme jako vysokopevnostní.
- Grafitace
Dalším zvyšováním teploty na hodnotu 2000 až 3000 °C opět v inertní atmosféře vznikne mezi atomy uhlíku trigonální vazebná konfigurace, zformovaná do turbo-statických rovin (uspořádaná vrstvená struktura). Vznikne vysokomodulové vlákno s obsahem uhlíku až 99 %.
- Povrchová úprava
Povrch takto vytvořeného vlákna je nutné pro zvýšení adheze k matrici mírně oxidovat. Vlákna se proto ponoří do oxidačního roztoku kyseliny dusičné (HNO₃), nebo chlornanu sodného (NaClO), kde se zdrsí jejich povrch. Následně je vlákno ještě opatřeno ochrannou vrstvou proti poškození, navedeno do spřádacího stroje, který jemná vlákna spřede do požadovaných průměrů a navíjí. [18,19]



Obr. (13) Struktura uhlíkového vlákna [11]

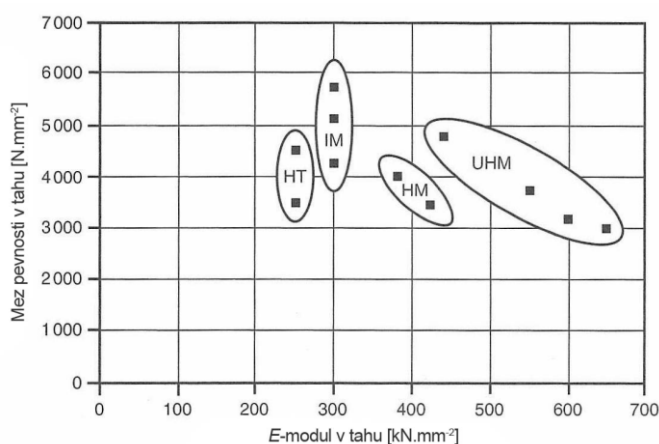
Typy uhlíkových vláken

Pro nejlepší mechanické vlastnosti vláken je rozhodující těsnost sítě silných vazeb v jejich struktuře. Jejich pevnost a E- modul se v závislosti od uspořádání uhlíkových vrstev a poruch vzniklých během výroby může měnit. Ve směru vrstev může E-modul dosahovat až 100 000 N . mm⁻² a pevnost až 1 000 000 N . mm⁻². Naopak ve směru kolmém na

vrstvy jsou vazby slabé a dosahované hodnoty rapidně nižší. Podle modulového a pevnostního spektra vlákna rozdělujeme:

- High Modulus (HM) – vysoký modul,
- Intermediate Modulus (IM) – střední modul,
- Ultra/Very High Modulus (UHM, VHM) – velmi vysoký modul,

- Average Strength (AS) – standardní pevnost,
- High Tenacity (HT) – vysoká pevnost,
- Ultra/Very High Strength (UHS, VHS) – velmi vysoká pevnost. [11,18,19]



Obr. (14) Rozdělení uhlíkových vláken. HT – standardně pevné, IM – středně modulová, HM – vysoko modulová, UHM – ultravysokomodulová [11]

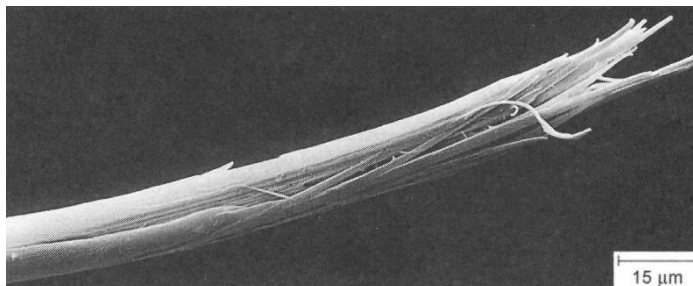
2.4.3.3 Aramidové vlákna

Patří mezi nejpevnější a nejdražší vlákna pro výrobu kompozitních materiálů. Jsou to vlákna aromatických polyamidů s dlouhým uhlovodíkovým řetězcem. Vyznačují silně orientovanou, vysoko krystalickou strukturou, vysokou tepelnou odolností a velmi dobrou odolností proti rozpouštědlům. Používá se pro výrobu leteckých dílů, neprůstřelné vesty, jako výztuž v pneumatikách, nebo jako ochrana proti přetržení optických a telefonních kabelů. [16]

Výroba aramidových vláken

Připravují se zvlákněním z roztoku 20 % para-fényltereftalamidu a kyseliny sírové. Pro zlepšení zpracovatelnosti se vlákna po zvláknění mnohokrát propírají a neutralizují. Není možné je připravit z taveniny, protože teplota tání T_m leží nad teplotou tepel-

ného rozkladu T_r . Podobně jako uhlíkové vlákna mají po zvláknění velmi špatnou adhezi k matici, proto je nutná povrchová úprava za pomoci vysokofrekvenční plasmy. [16,20]



Obr. (15) Struktura aramidového vlákna [11]

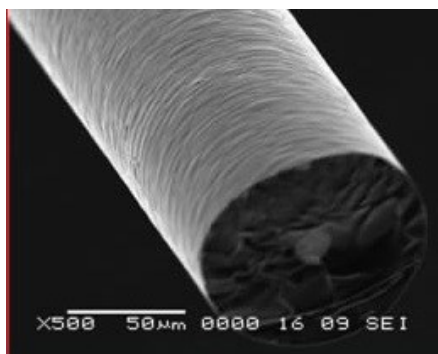
Typy aramidových vláken

Podle změn v strukturních modifikacích jsou jako jejich neznámější zástupci uváděny:

- Nomex (meta-aramidy),
- Kevlar (para-aramidy).

2.4.3.4 Borové vlákna

Další vysoce pevné a tuhé vlákno, používané pro výrobky vysokoteplotních aplikací, nebo extrémně tlakem namáhané díly v letecké a vojenské technice. Nevýhodou tohoto vlákna je opět jeho velmi vysoká cena. Vyjma výborných mechanických vlastností se vyznačuje nízkou tepelnou roztažností a vodivostí. [20]



Obr. (16) Struktura borového vlákna [21]

Výroba borových vláken

Vyrábí se metodou (chemical vapour deposition- CVD) chemickým nanášením par plynného bóru na tenký wolframový drát. Ten je pod vysokou teplotou tažený přes válcový

reaktor s přívodem chloridu boritého (BCl_3), který se zde rozloží na plynný bór a kondenzuje na wolframovém drátu. Vláknó má průměr asi 12 μm a vyrábí se ve formě filamentu. [20,21]

Typ vlákna	Sklo	Aramid	HS - uhlík	HM - uhlík
Modul pružnosti v podélném směru E_{RL} (MPa)	74 000	130 000	230 000	390 000
Modul pružnosti v příčném směru E_{RT} (MPa)	74 000	5 400	15 000	6 000
Modulu pružnosti ve smyku G_{RLT} (Mpa)	30 000	12 000	50 000	20 000
Pevnost v tahu σ_{RL} (MPa)	2 100	3 000	5 000	3 800
Hustota ρ (kgm^{-3})	2 500	1 500	1 600	1 700

Tab. (2) Základní mechanické vlastnosti jednotlivých druhů vláken [17]

2.4.4 Roviny a tkaniny

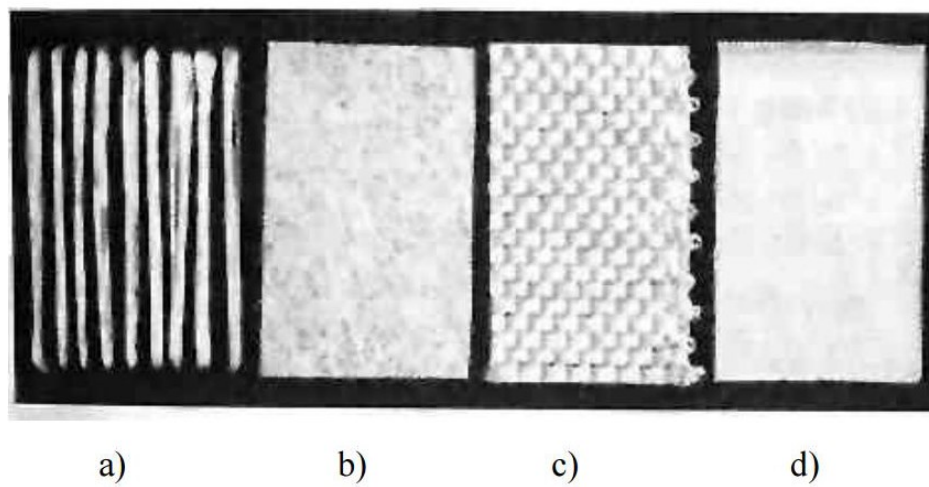
Z hlediska zpracování se samotná vlákna jako výztuž téměř nepoužívají. Pro usnadnění manipulace při použití se spřádají do formy tkanin, co platí pro všechny výše uvedené vlákna.

- Roviny, je to svazek uspořádaných nekonečných vláken. Počet těchto elementárních vláček může být až 24 tisíc. Tyto svazky jsou označovány podle tloušťky například 1K, 3K, ..., 24K, kde 1K se rovná 1000 filamentů. Takto upravené mohou být použity při zpracování pultruzí, navíjením, nebo se dále spřádat.
- Rohože, jsou tvořeny z krátkých sekaných nebo dlouhých nepravidelně uložených vláken ve vrstvách, nebo smyčkách tvořící vrstvy, navzájem spojená pojivem.
- Tkaniny, vyrábí se z pramenů vláken, utkaných v orientovaných směrech. Orientace opakujících se vláken se nazývají vazby, které u tkanin dělíme na tři základní: plátovaná, keprová a atlasová.

Při ukládání svazků do tkaniny mohou být použity i jiné druhy jednotlivých typů vláken, čím dostáváme hybridy, které využívají vlastnosti různých vláken.

- Úplety, vlákna zpracována pletením, vytvářející úplety nejrůznějších tvarů. Dokonce umožňují vytvořit i trojrozměrný úplet.
- Pleteniny, struktura jejich úpletu je uzpůsobená tvaru a způsobu namáhání k určené aplikaci. Mohou být vyztuženy v konkrétních směrech a odpovídajícímu zatížení.

[11,16]



Obr. (17) Druhy textilií: a) roving, b) rohož, c) tkanina z pramenců, d) tkanina z vláken

[11]

3 CHARAKTERISTIKA VRSTVENÝCH KOMPOZITŮ

Jejich princip spočívá ve vrstvení jednotlivých materiálů na sebe a následným pro-sycení ztužovací spojitou fází (matricí). Jsou složeny buď ze dvou, nebo více vrstev se stejnými, ale jinak orientovanými vlákny, nebo z úplně odlišných typů materiálů a jejich vlastnostmi. Jejich spojením, získá výsledný produkt vlastnosti všech dohromady. Toto skládání materiálů dává vysokou variabilitu vlastností v závislosti, jestli požadujeme výrobek vysoce pevný, stabilní, odlehčený, nebo pružný. Podle směru zatížení, vykazují různé mechanické vlastnosti, co je rovněž důležitou vlastností. Kromě jejich mechanických vlastností se vyznačují i výbornou odolností proti chemickým vlivům a prostředí, nízkou roztažností a výbornými tepelně-izolačními vlastnostmi. [8,22]

3.1 Rozdělení podle složení

V závislosti na druhu materiálu, ze kterého se kompozitní materiál skládá, je dělíme:

- Laminát

Jsou tvořeny střídáním vrstev stejné výztuže s rozdílným úhlem natočení a možným rozdílem, ve vlastnostech v závislosti od použitého úpletu. Střídáním orientace vláken při laminování dosahujeme izotropních vlastností, čím kompozit získává stejné vlastnosti při zatížení nezávislém na směru. Této vlastnosti se využívá, ku příkladu pro skořepinový laminát, vyráběný kladením vrstev již do tvaru požadovaného dílu. [23]

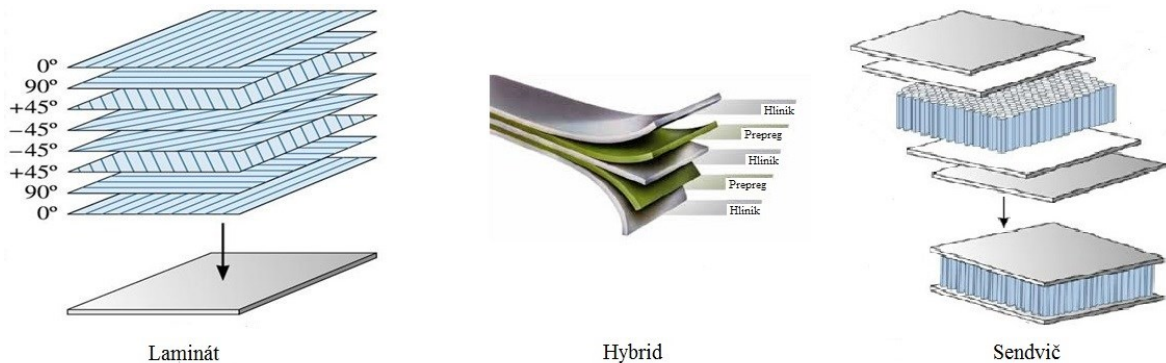
- Hybrid

Hlavním rozdílem od laminátů, je v použití různých materiálu, které se vzájemně doplňují za dosáhnutí výrobku požadovaných vlastností. Příkladem takého kompozitu může být materiál tvořený z vrstev hliníku a skelného prepregu, označovaný jako GLARE (Glass Laminate Aluminium Reinforced Epoxid). Používá se jako náhrada hliníkových plášťů letadel. Oproti konvečním hliníkovým dílům má vyšší pevnost a nižší hmotnost, co je základní cíl v současném leteckém průmyslu. [22,23]

- Sendvič

Používají se hlavně pro odlehčení různých konstrukcí, ale také pro zvýšení jejich pružnosti a odolnosti. Výsledné vlastnosti jsou dané použitými materiály. Vyrábí se spojením jádra zabezpečujícím jeho lehkost, a tuhou vnější a vnitřní stěnou, které materiálu zase dodávají tuhost a odolnost. Jako jádro se používají tenké hliníkové voštiny, nebo tuhé polyuretanové

(PUR) pěny, umístěné ve stěnách ze skelných, nebo uhlíkových laminátů. Jejich vlastnosti se využívají hlavně v letectví, ale i v ostatních odvětvích dopravního průmyslu. [22,23]



Obr. (18) Struktura složení laminátu, hybridu a sendviče [14]

3.2 Technologie výroby vrstvených kompozitů

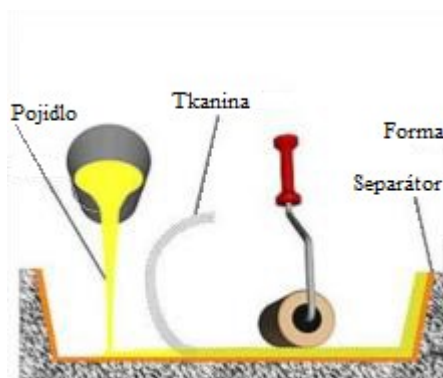
Díly vyráběné z vrstvených kompozitních materiálů je možné vyrobit vícerymi způsoby. Technologie výroby je rozdílná hlavně v závislosti od požadavků na tento díl. Rozhodující je velikost, tvarová obtížnost, způsob zatížení, nebo náklady spojené se samotnou výrobou. Při množství technologií se tak nabízí prostor pro výběr technologie, která bude odpovídat specifikovaným požadavkům na finální výrobek. Ve všeobecnosti jde o vytvarování výztuží z vláken, jejich navrstvení do formy výsledného tvaru a následné prosyčení pojivem. Po jeho vytvrzení za působení zvýšené teploty v temperační peci dostáváme finální kompozitní materiál. [23]

3.2.1 Ruční kladení

Je to nejstarší a stále často používaný způsob výroby malých, nebo velkoplošných dílů, například pro lehká letadla. Je závislý na zručnostech a zkušenostech pracovníka, což můžeme považovat i za nevýhodu této metody, protože jsou nutné časté kontroly kvality zpracování. Na druhou stranu hmatové vnímání lidských rukou a možnost vizuální kontroly kladení jsou neocenitelným faktorem této metody.

Při výrobě ručním kladením je důležitá zejména kvalita a čistota použité formy, protože její hladkost a následné nanesení separačního činidla na vyleštěný povrch, po vytvrzení materiálu, umožní jeho lehké vyjmutí. Do takto připravené formy (většinou negativní) se v různé orientaci na sebe začnou skládat připravené prepregy a jemně se štětcem,

nebo gumovým válečkem přitlačují k formě, aby odstranili všechny vzduchové kapsy. Pokud se nepoužívají již prosycené prepregy, ale suché tkaniny, nejdříve se na formu nanese pojivo, položí se tkanina, která se znovu pokryje vrstvou pojiva a postup se opakuje. Po uložení poslední vrstvy se forma pokryje neprodyšnou fólií a za pomoci podtlaku vysaje vzduch, čím ještě zpevní jednotlivé vrstvy k sobě. V tomto stavu se nechává vytvrdit po dobu 12 hodin a následně se dá ještě dotvrdit do temperační peci při teplotě 60 °C, po dobu dalších 12 hodin. [8,24]

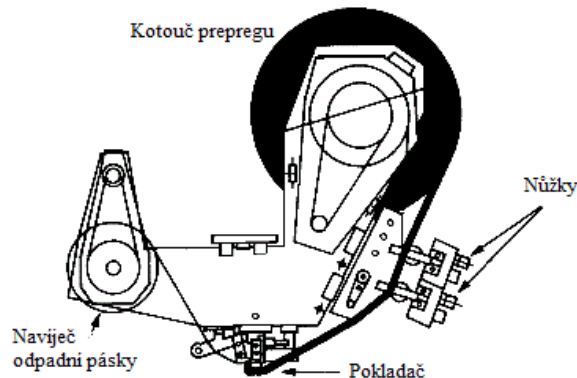


Obr. (19) Ruční kladení do negativní formy [24]

3.2.2 Automatické kladení

Zpracování automatickým kladením, bylo zkonstruováno jako metoda urychlení a zefektivnění ručního kladení. Metoda je vhodná zejména pro velkoplošné díly s minimálním počtem tvarových změn, jako jsou například křída, při které dokáže snížit čas potřebný na výrobu a minimalizovat počet vzniklých vad, což snižuje náklady na proces zpracování těchto výrobků. Na druhou stranu, zařízení samé osobě je velmi nákladnou záležitostí.

Základem tohoto zařízení je hlava pohybující se po třech osách, kopírující povrch formy, na který odvíjí, stříhá a klade pásy prepregů. Současně je zahřívá, čím dopomáhá k jejich přilnavosti a přitlačení pásů o formu odstraňuje zpod tkaniny vzduchové bubliny a zpevňuje spojení jednotlivých vrstev. [5,24]



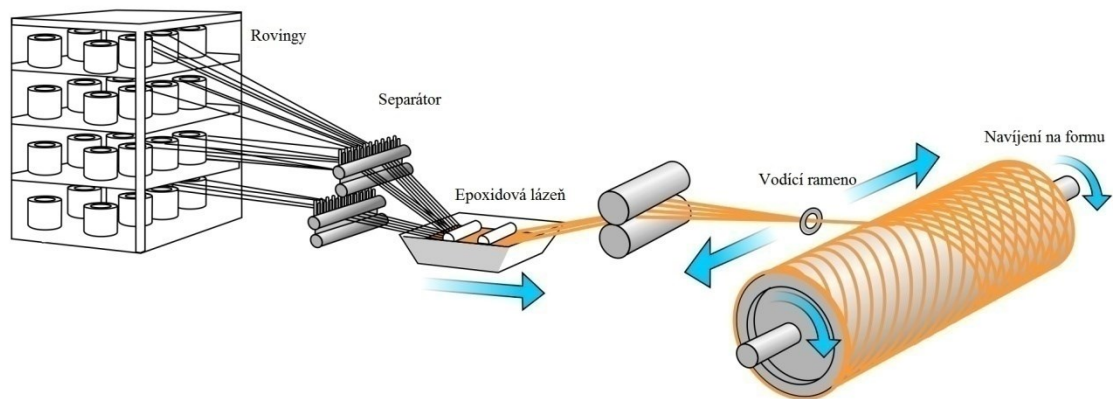
Obr. (20) Princip funkce hlavy automatického kladení [24]

3.2.3 Autokláv

V podstatě jde o ruční kladení, kde se po položení prepregu a odsátí vzduchu, vloží celá forma ještě do autoklávu, co je vlastně přetlaková komora s regulovatelnou teplotou. Tam se pod kombinací působících tlaků komory a vakua formy vrstvy tkanin vytvrdí, na kompozitní materiál s minimální pórovitostí a minimálním obsahem vzduchových bublin. Hlavními výhodami je rychlost zpracování a lepší výsledné vlastnosti, než jen běžným způsobem vytvrzení. Nevýhodou jsou vysoké počáteční náklady. [24]

3.2.4 Rotační navíjení

Princip této metody spočívá v otáčející se formě, umístěné na hřídeli, na kterou se navíjejí nekonečně dlouhé naimpregnované tkaniny nebo pásy prepregů. Rameno zabezpečující uložení tkaniny se může pohybovat podél celé formy, dokonce i měnit orientaci a tlak kladení, a tím zabezpečit rovnoměrně souvislou vrstvu v celé konstrukci výrobku, nebo její rozdílnost v místech potřeby. Používá se například pro výrobu tlakových nádob, nebo potrubí, krytů motorů velkých dopravních letadel, nebo pro jejich trupy. Počáteční náklady této metody jsou relativně vysoké, ale při následné sériové výrobě, cena výroby podstatně klesá s porovnáním s ručním kladením. [24]

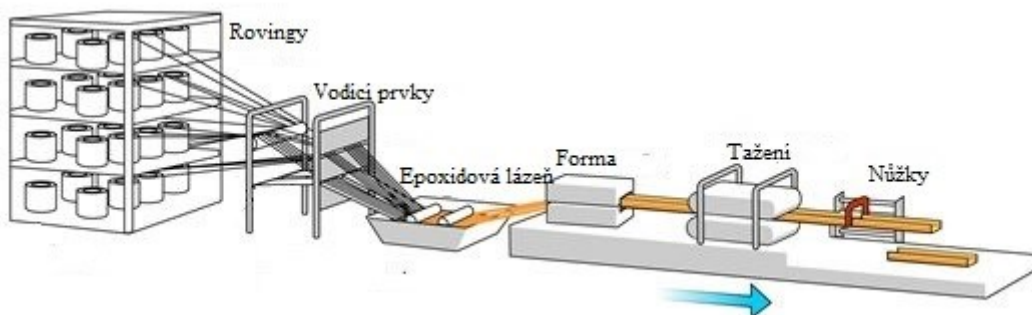


Obr. (21) Schéma výrobního procesu rotačním navíjením [26]

3.2.5 Pultruze

Je to vynikající metoda pro tvorbu nekonečně dlouhých kompozitních materiálů různých tvarů. V porovnání s ostatními metodami umožňuje dosažení podílu vláken v objemu více než 70 % a je rovněž nejekonomičtější. Používá se zejména pro výrobu polyesterových profilů, určených pro stavební aplikace, ale využití uplatní i v dopravním průmyslu.

Základem výroby této metody je navedení a srovnání rovinků do zpracovatelského zařízení, kde jsou buď to tažené přes pryskyřiční lázeň a naimpregnované vstupují do formy, která jim propůjčí tvar, nebo se přesytí pojivem až po vstupu do formy, zastříknutím. Ve formě dojde k vytvrzení a zafixování tvaru a po vytažení z formy se řezou na požadovanou délku. Rychlost výroby je až 150 cm za minutu. [8,24]



Obr. (22) Schéma výrobního procesu pultruze [26]

3.3 Kompozity v letectví

Kompozitní materiály používané pro letectví můžeme podle zařazení rozdělit do tří kategorií:

3.3.1 Vojenské letectví

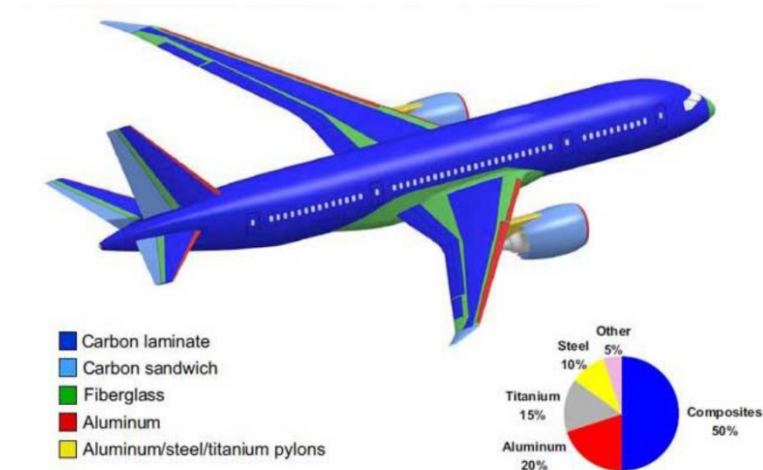
Tyto materiály využívá již spousta let, bylo průkopníkem ve vývoji, zpracování a použití těchto materiálů. Příkladem může být bojová stíhačka F-117, které plášť je vyrobený z kompozitu na bázi uhlíkových vláken. Okrem výborných mechanických vlastností, povrch těchto kompozitních materiálů, neodráží radarové vlny, čím ho činí neviditelným a dává tak letounu velkou strategickou výhodu. [26]



Obr. (23) Uhlíková konstrukce stíhacího letoun F-117 [26]

3.3.2 Civilní letectví

Používání moderních kompozitních dílu v civilním letectví se začalo v 70 tých letech kdy podíl obsahu těchto materiálů na letadle činil jen asi 5 %. Dnes je tento podíl více než 60 % a neustále se vyvíjejí nové materiály a technologie k jeho růstu. Příkladem je prototyp letadla je společnosti Bombardier Aerospace, která v roce 2008 začala vývoj dopravního letadla nové generace s označením Learjet 85, pozůstávající výhradně kompozitních materiálů. [26,27]



Obr. (24) Zastoupení kompozitních materiálů v konstrukci Boingu 787 [27]

3.3.3 Sportovní létání

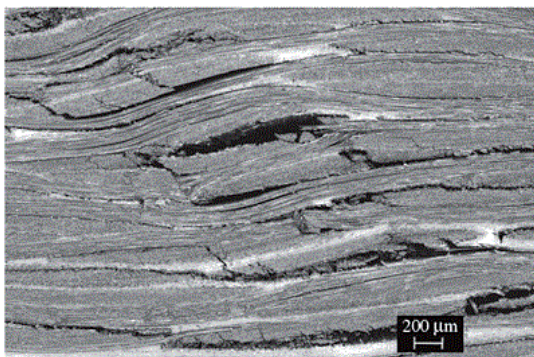
Do této kategorie se řadí ultralehká letadla, kluzáky a akrobatická letadla. Podíl kompozitních materiálů v těchto letadlech dosahuje až 85 %. Kromě pohonné a řídicí jednotky se téměř celý letoun skládá z materiálů vyztužených vnější vláknovou soustavou a vnitřní hybridní konstrukce. Tyto materiály dosahují vynikající bilance mezi pevností, odolností, pružností a hmotností, co z nich dělá ideální konstrukční prvek pro stavbu malých a lehkých letadel. Jejich používání je dané zejména svými mechanickými vlastnostmi, ale i dostupnou nižší cenou výroby v porovnání s běžnými díly se slitin a hliníku. Díly se můžou připravit již v požadovaném tvaru s určenými body plánovaného zatížení a nemusí se dlouze a nákladně zpracovávat obráběním, při kterém vzniká i velké množství odpadu. [27]



Obr. (25) Kompozitní struktura letounu Bristell NG-5 [27]

4 STÁRNUTÍ KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ

Stárnutí kompozitních materiálů s polymerní matricí je definován jako souhrn nevratných změn vlastností materiálu, ke kterým dochází vlivem opakovaných mechanických, tepelných, nebo tepelně-mechanických zatěžování za současného působení dalších interiérových a exteriérových faktů. Často působí víc vlivů najednou, čím je celkový účinek stárnutí ještě pronikavější. Projevuje se trvalými změnami některých vlastností, zejména ztrátou tažnosti, rázové houževnatosti, snížením pevnosti, úbytkem hmotnosti, vzniku povrchových prasklin, nebo jinými vizuálními, nebo chemickými vlastnostmi. Tyto změny označujeme jako degradaci. V závislosti od druhu působícího vlivu ji rozdělujeme: [28, 29]



Obr. (26) Zobrazení účinku degradace na epoxid/uhlík kompozit [29]

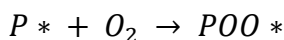
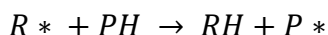
4.1 Degradace vlivem vnějšího prostředí

Materiál je vystaven působení vnějšího prostředí kombinací různých atmosférických vlivů, které se navzájem podporují a společně se zapříčiňují o pokles mechanických a fyzikálních vlastností. Při jednotlivém působení by jejich vliv nebyl tak efektivní, jako při kooperaci což naznačuje chování vykazující synergii. A však v některých případech zase může vést působení vícero faktorů k zpomalení stárnutí, vlivem jejich protichůdné účinnosti. [8,9]

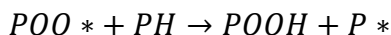
4.1.1 Degradace vlivem kyslíku

Na difuzi kyslíku do materiálu a jejich reaktivnost má velký vliv struktura a jeho chemické složení. Odolnost kyslíku vykazují zejména nasycené nerozvětvené řetězce. Naopak největší citlivost k oxidaci se projevuje u dvojných vazeb a přítomnost terciárních vazeb C-H. Při degradaci kyslíkem se vyvolá řetězová reakce, při které reaktivní produkt nebo meziproduct vyvolá další reakci. Celý mechanismus oxidace se skládá ze tří částí:

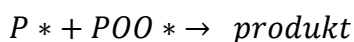
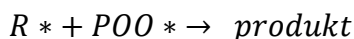
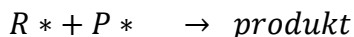
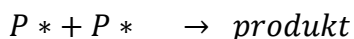
- Iniciace: dochází k štěpení slabých vazeb a vytvoření reaktivních radikálů



- Propagace: vzniknuté radikály reagují s kyslíkem a vznikají peroxi-radikály, abstrahující z řetězce polymeru vodík za vzniku hydroperoxidů, které se dále rozkládají na nové radikály.



- Terminace: je to proces, kdy z volných radikálů vznikají neaktivní produkty



Metody určení

Vlivem oxidační degradace dochází na polymerních řetězcích k jejich štěpení, nebo sítování. Tyto dvě konkurenční reakce vedou k snížení, nebo zvýšení molekulové hmotnosti na základě čehož dokážeme určit dopad oxidace na materiál. Mezi metody určení patří například:

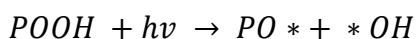
- Osmometrie
- Gelová plynová chromatografie
- Viskozimetrie [8,29]

4.1.2 Degradace vlivem ozonu

Ozon je forma kyslíku obsahující tři molekuli O_3 . Vyskytuje se jako vrstva ve stratosféře, která zachycuje UV záření. Tato vrstva je silná asi jenom 2 až 8 ppm (parts per milion- částic na jeden milion) a má vysoce oxidační vlastnosti způsobující degradaci materiálů oxidací. V podstatě se jedná o podobný postup degradace jako u kyslíku s rozdílem, že reakce je rychlejší a bez indukční periody. [8,9]

4.1.3 Degradace UV zářením

Má jeden z největších dopadů na degradaci polymerních materiálů. Paprsky ultrafialového záření jsou součástí slunečního světla v oblasti vlnové délky od 280 nm do 400 nm, které způsobují rozpad vazby mezi atomy. Jejich rozbití je zapříčiněno dopadem elementárních částic pohybujících se rychlostí světla a s velkou energií též nazývaných fotony. Porušením vazby dochází k rozdělení makromolekul na menší řetězce, které následně za kooperace se vzdušným kyslíkem degradují. Tuto spolupráci nazýváme fotooxidace. Hlavní produkt fotooxidace jsou hydroxidy, které se po ozáření dále rozkládají:



Působení záření vždy začíná v povrchové vrstvě pronikáním do větší hloubky, kde způsobují strukturální změny a dochází k štěpení, větvení, případně dalšímu síťování, důsledkem čehož materiál ztrácí svoji pružnost, pevnost a zvyšuje naopak svoji křehkost, což při běžném, namáhání může znamenat narušení materiálu a vytvoření trhlin. [8,9]

4.1.4 Degradace vlivem teploty

Při vystavení povrchu polymerních materiálů běžným vnějším teplotám nedochází k tepelné degradaci, ale vlivem možných vysokých denních teplot, může docházet k rozměrovým změnám, které polymer nedokáže vyrovnat a v materiálu tak vzniká napětí, které může být příčinou vzniku trhlinek, jeho rozrušování, nebo změnou krystalinity, která rovněž může znásobit dopad narušování materiálu vlivem difuze kyslíku do struktury. Odolnost pryskyřičných pojiv na působení vysoké teploty, závisí na síle vazby, stupni zesíťování a do značné míry i na typu použitých tvrdidel. Při použití tvrdidla s alifatickými řetězci, je výsledná odolnost materiálu menší, než při použití tvrdidla s aromatickým jádrem. Struktura s aromatickým jádrem je stabilnější a nepodléhá tak lehkému tepelnému vlivu. Dalším z vlivů, který ovlivňuje stabilitu, je počet funkčních skupin. Oproti bifunkčním mají 3funkční a 4funkční pryskyřice odolnost vyšší o 20 až 40 °C. [8,9,11]

Pro kompozitní materiály používané v letectví obecně platí, že zvýšená teplota má negativní vliv na pevnostní charakteristiky spojitých fází. Důležitým faktorem je teplota skleného přechodu T_g , při které nastává velmi významná změna vlastností. Maximální provozní teplota leteckých konstrukcí se doporučuje volit minimálně 20°C pod teplotou T_g . [8,9]

Metody určení:

Metody hodnocení tepelné degradace materiálů dělíme v závislosti na druhu měřených vlastností na:

- termické analýzy (DSC, DMA, TGA)
- analýza deformací (Vicat, Martens, TGA)

4.1.5 Degradace vlivem vlhkosti

Polymerní materiály ve všeobecnosti, jsou náchylné na absorpci kapalného nebo plynného média, co má za následek zhoršení jejich výsledných mechanických a fyzikálních vlastností. Toto platí i pro termosetické polymery, jako třeba epoxidové pryskyřice, které jsou hodnoceny jako materiály odolné vůči vlhkosti. Degradací účinek vlhkosti se vyskytuje zejména u materiálů s hydrolyzovatelnými skupinami, jako jsou například esterové skupiny, amidové skupiny, nebo nitrilové skupiny, nacházející se v lineárním řetězci a projevuje se změnou krystalinity, bobtnáním, nebo vytěsňováním plniv a aditiv. V případě, že se jedná o kompozitní materiál a hydrolyze podléhá i výztuž, může mít podobný účinek na změny mechanických a fyzikálních vlastností jako u matrice. Ve vícevrstvých laminátech absorbovaná vlhkost narušuje adhezi mezi maticí a pojivem, čím dochází ke klesání jejich pevnosti a rozrušení. Dochází k takzvané erozi materiálů. Příkladem účinku eroze může být výzkum konstrukce kompozitních materiálů nadzvukových letadel při srážce s kapkami deště v nadzvukové rychlosti. Při dopadu kapky na povrch polymerního materiálu dochází v místech okrajů dopadu kapky k deformacím a vzniku mikrotrhlinek, které byly dále rozrušovány pronikající vodou. [8,9,29]

Obecně platí, že vystavení vlhkosti je nutné riziko, které musí být při běžném používání brát v potaz.

4.2 Degradace vlivem použití

Kromě vlivů atmosférických faktorů na degradaci polymerních kompozitních materiálů na ně mají vliv i jiné, spojené s běžným používáním výrobku. Jejich působení má zpravidla větší vliv na výsledné mechanické a fyzikální vlastnosti, a v závislosti od expozice, jsou i mnohem rychlejší. [9]

4.2.1 Chemická degradace

V případě polymerních materiálů s termosetickou maticí, jako například epoxidová pryskyřice se všeobecně vyznačují vysokou odolností proti rozpouštědlům. Jejich struktura je většinou tvořena vazbami C-C, C-O a C-N-C z nichž právě nasycené vazby C-C jsou velmi rezistentní. Jejich chemická rezistence stoupá s délkou řetězce molekuly a stupněm zesíťování. Jsou velmi dobře odolné alkáliím i zředěným organickým a anorganickým kyselinám. [9,29]

4.2.2 Degradace mechanickým namáháním

K degradaci mechanickým namáháním kompozitních materiálů dochází podobně jako u jiných materiálů při dlouhodobém dynamickém zatěžování. V důsledku opakovaných napětí působících na materiál, dochází k poklesu jeho pevnosti, tuhosti a pružnosti, což je následkem jeho poklesu strukturálních vlastností a vzniku porušení. Narušení struktury při nemechanickém namáhání je složitější, proto vznik vad rozdělujeme do pěti základních fází narušení:

- Praskání matrice

Dochází při ní k prvotnímu porušení spojitě fáze. Nejdříve se objevuje ve vrstvách vláken s orientací 90° a následně v dalších vrstvách od 0° , což je způsobeno napětím na rozhraní matrice – vlákno. Tento stav způsobí pokles tuhosti o 10 % a má jen zanedbatelné účinky na pevnostní vlastnosti kompozitu.

- Narušení vláken a spojování trhlin

V důsledku narušení spojitě fáze dochází k praskání vláken a šíření trhlin k vrstvám s podélně uloženými vlákny a jejich následnému šíření v tomto směru. S nárůstem zatížení dochází ke koncentraci napětí na rozhraní vrstev v důsledku, čeho dochází k praskání přilehlých vláken.

- Iniciace delaminací (vznik separace vrstev v kompozitu)

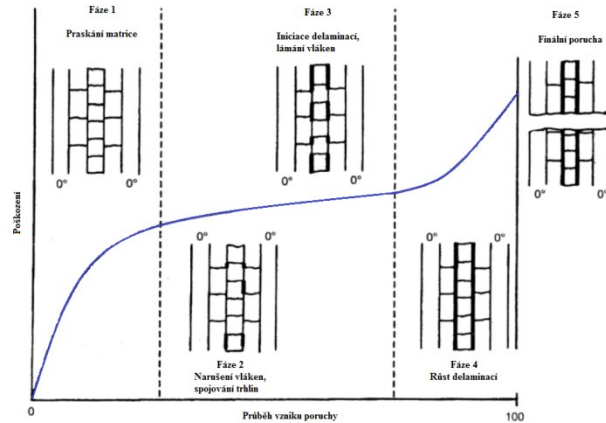
Při šíření trhliny v podélném směru vláken mezi vrstvami se začíná zvyšovat napětí a dochází k iniciaci jejich separace.

- Růst delaminací

Další zvyšování napětí mezi vrstvami způsobí izolaci vláken a následně odizolování jednotlivých vrstev kompozitu. V tomto stavu výrazně klesá tuhost a následně i pevnost.

- Finální porucha

Napětí na vrstvách laminátu jsou tak vysoké, že způsobí finální poruchu. [17,23,30]

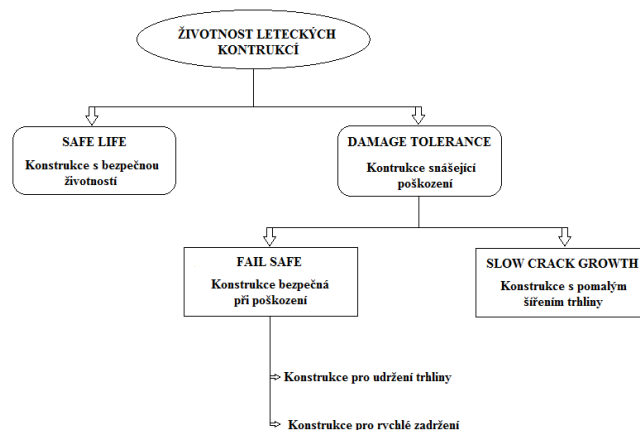


Obr. (27) Fáze poškozování kompozitního materiálu [30]

4.3 Hodnocení životnosti leteckých konstrukcí

Stav materiálu od výroby, do doby kdy vlivem zhoršujících se vlastností dále nemůže být použit pro svou funkci, označujeme jako životnost výrobku.

V současné době je návrh leteckých konstrukcí z pohledu jejich životnosti a únavy rozdělený do dvou určujících hledisek:



Obr. (28) Schéma rozdělení hledisek hodnocení životnosti leteckých konstrukcí [14]

Safe live (konstrukce s bezpečnou životností), kdy musí být prokázané, že výskyt poškození v průběhu celé životnosti konstrukce musí být extrémně nepravděpodobný.

Damage tolerance (konstrukce snášející poškození), konstrukce musí i v případě výskytu nadměrných zatížení, vydržet odpovídající zatížení až do doby odhalení poruchy. Přístup předpokládá výskyt poruchy v nejrůznějších částech konstrukce vniklých už při výrobě, nebo během provozu.

Slow crack growth (konstrukce s bezpečným šířením trhlin), při vzniku trhliny je zamezeno jejímu dalšímu šíření až do dosažení kritické hodnoty k jejímu nestabilnímu šíření. Postup trhliny je velmi pomalý v kontrolovaných sekvencích, zabezpečující bezpečnost konstrukce.

Fail safe (konstrukce bezpečná při poškození),

- konstrukce navrhnutá se segmentů, jejichž účel je trhlínu udržet lokálně a zamezit jí tak přístup do dalších jejích částí
- návrh této konstrukce spočívá v rychlém zamezení šíření nestabilní trhliny. [27,30]

II. PRAKTICKÁ ČÁST

5 CÍLE DIPLOMOVÉ PRÁCE

Cíl diplomové práce je zaměřený na identifikaci důvodů zlých mechanických vlastností finálního produktu, podle zadání firmy vyrábějící kompozitní díle na ultralehké leteouny s matricí na bázi epoxidové pryskyřice. Konkrétně je práce vztažena na kryt motoru, který v průběhu doby používání ztrácí svou tuhost a dochází k poklesu viskoelastických vlastností.

Teoretická část

Teoretická část diplomové práce popisuje krátkou historii leteckých kompozitních dílů používaných v minulosti a jejich progres v současném letectví. Zabývá charakteristikou dílce v závislosti na jeho matrici a výztuži. Popisuje jednotlivé složky kompozitu, způsoby jejich výroby, zpracování, vlastnosti, rozdělení a použití. Teoretickou část uzavírá charakteristika možných vlivů způsobujících zhoršení mechanických vlastností v závislosti na podmínkách, kterým je dílec v průběhu své životnosti vystaven.

Praktická část

V úvodu praktické části diplomové práce jsou charakterizované jednotlivé použité materiály a jejich vlastnosti. Práce popisuje metodiku přípravy, samotnou laminaci a vytvrzení podle výrobního postupu dané firmy na základě čehož byla rovněž připravena zkušební tělesa a následně podrobena analýzám pro odhalení důvodu poklesu mechanických vlastností. Metody zkoušek použité v praktické části jsou stručně popsány a následně vyhodnocené se závěrem a doporučeným řešením k odstranění problému.

Metody analýzy:

- Diferenční skenovací kalorimetrie DSC
- Dynamická mechanická analýza DMA
- Spektrometrická analýza FTIR
- Ohybová zkouška
- Test tvrdosti podle ShoreD

6 POUŽITÉ MATERIÁLY

Použité materiály zodpovídají skladbě a složení kompozitních dílů pro ultralehké letouny konkrétně pro letoun Bristell NG-5, se zaměřením na kapotu motoru, namáhanou zejména vysokými teplotami, mechanickým zatížením odporu větru a vlivem vnějšího prostředí.

6.1 Matrice

Jako vhodná matrice pro výrobu kompozitních materiálů určených pro letecké odvětví se používá zejména epoxidová pryskyřice. Důvodem jejich použití jsou dobré mechanické vlastnosti, výborná adheze k výztuži, menší polymerační smrštění a větší tepelná a rozměrová stabilita. Pro její vytvrzení se používá, tvrdilo, které v struktuře kapalného epoxidu vytvoří trojrozměrnou síť s vlastnostmi pevného a netavitelného tělesa.

6.1.1 Epoxidová pryskyřice HAVEL L 285

Jak uvádí výrobce je to velmi kvalitní certifikovaná pryskyřice vyvinutá speciálně pro letecký průmysl. Vyrobena kondenzací bisfenolu A a epichlorhydrinu. Chemicky stabilní, bez předpokladu vzniku nebezpečných reakcí, vhodná pro všechny běžné laminační metody. Při krátké expozici nemá žádný významný vliv pro lidské zdraví. Při dlouhodobé expozici může vyvolávat alergickou dermatitidu a má též mutagenní a karcinogenní účinky.

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

Tab (3) Specifika epoxidové pryskyřice L 285 [31]

6.1.2 Tvrdidlo HAVEL H 286

K vytvrzení této konkrétní pryskyřice L285 se primárně používají tvrdidla s označením 285, 286 a 287. V našem případě použijeme tvrdidlo 286. Poměr při míchání

je 100:40 (váhový) a 100:50 (objemový) a doba zpracovatelnosti je v rozmezí mezi 45 minutami až 6 hodinami v závislosti na použitém tvrdidle a teplotě.

Teplota	Tvrdidlo 285	Tvrdidlo 286	Tvrdidlo 287
20 - 25 °C	2 - 3 hodiny	3 - 4 hodiny	5 - 6 hodin
40 - 40°C	45 - 60 minut	60 - 90 minut	80 - 120 minut

Tab (4) Hodnoty zpracování dle teploty a typu tvrdidla [31]

Při vytvrzení za teploty 50 až 55 °C systém splňuje standard pro větřoně a ultralehké letouny. Pro požadavky motorových letadel je nezbytné tepelné vytvrzení při 80 °C. Pokud není požadována vysoká tepelná odolnost či letecké schválení, dá se tužidlo 286 použít bez následného temperování.

Specifikace při 25 °C		Tvrdidlo 285	Tvrdidlo 286	Tvrdidlo 287
Hustota	g/cm ³	0,94 - 0,97	0,94 - 0,97	0,93 - 0,96
Viskozita	mPas	50 - 100	60 - 100	80 - 100
Aminové číslo	mg KOH/G	480 - 550	450 - 500	450 - 500
Barva	Gardner	max 3	max 3	max 3

Tab (5) Specifikace tvrdidel typu 285, 286 a 287 [31]

Viskozita směsi se vyznačuje rychlým a velmi dobrým prosycením vláken. Za účelem získání specifických vlastností je možné do směsi přidat nejrůznější plniva. Nevýhodou epoxidových matric je relativně vysoká sorpce vody, co způsobuje snížení teploty T_g a zhoršení mechanických vlastností.

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

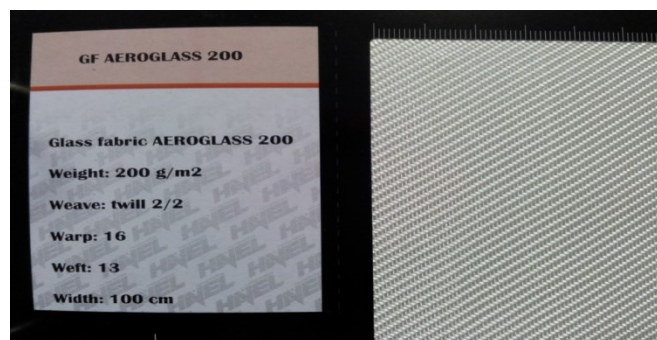
Tab (6) Mechanické vlastnosti nevyztužené pryskyřice [31]

6.2 Výztuž

Jako výztuž je použito několik různých tkanin, které svými specifickými charakteristikami doplňují výsledné vlastnosti kompozitního materiálu. Dosahují mimořádně vysoké pevnosti v tahu při nízké hmotnosti.

6.2.1 Skelná tkanina AEROGLOSS

Velmi kvalitní skelná tkanina, dobře se prosycuje a po prosycení je velmi transparentní. Jedná se o vysokopevnostní tkaninu s vazbou kepr 2/2 a plošnou hmotností 200 g/m², určenou pro letecké aplikace.



Obr (29) Skelná tkanina AEROGLOSS, vazba kepr 2/2

6.2.2 Aramid-uhlíková tkanina HYBRID

Je to hybridní tkanina aramidů a uhlíku s plátňovou vazbou a plošnou hmotností 160 g/m². Vyznačuje se vysokou kvalitou a vynikajícími pevnostními vlastnostmi

v poměru k hmotnosti. Používá se pro výrobu nejmodernějších kompozitních prvků HI-TECH technologií, ve sportovním, automobilovém a leteckém odvětví.



Obr (30) Aramid-uhlíková tkanina HYBRID, vazba plátno

6.2.3 Jádru AIREX C70- 1,2 mm

Jedná se o polymerní pěnu s uzavřenými buňkami, která v sobě kombinuje vynikající poměr pevnosti k váze s vysokou tuhostí. Používá se jako jádrový materiál pro širokou škálu sendvičových konstrukcí zatěžovaných jak statickým, tak dynamickým namáháním. Jemná buněčná struktura se nedrobí, je odolná vůči chemikáliím a její povrch je snadno lepitelný.

6.3 Forma

Forma patří mezi nejdůležitější součást při přípravě kompozitního materiálu. Čistota a jemnost jejího povrchu jsou rozhodující pro výsledný povrch produktu, kde jeho nedostatky mohou být příčinou vzniku nedokonalostí, případně prasklin. S přihlédnutím na náklady a čas spojený s výrobou se jedná o velice důležitý faktor.



Obr (31) Připravená forma pro ruční laminaci

Vzhledem ke svým vlastnostem a ceně se forma vyrábí z polyesterové pryskyřice. Před použitím je vyleštěna a ošetřena separátorem pro lehké vyjmutí vytvrzeného dílu.

6.3.1 Separátor PARTAL HI-Temp Wax

Speciální separátor na bázi tetrafluoretylenu TFE, používaný pro epoxidové a polyesterové pryskyřice. Má antikoroziční vlastnosti, žádnou afinitu k produktu a je vhodný pro aplikace při teplotě do 177 °C.

6.3.2 Povrchová úprava

V případě potřeby je možné na separační film ještě nanést základovou barvu, nebo bezbarvý lak obsahující stabilizátory proti UV záření.

7 VÝROBA ZKUŠEBNÍCH TĚLES

7.1 Postup při laminaci

Práce je zaměřena na letecké materiály, proto budu demonstrovat postup přípravy testovacích těles na laminaci spodní kapoty již zmiňovaného letounu Bristell NG-5, která je obzvlášť zatěžována, tepelným či mechanickým působením. Pro účely zkušebních těles, bude celý postup laminace převeden na plochou desku, ze které bude možné nařezat rovné vzorky, vhodné pro testovací aplikace.

7.1.1 Příprava formy

Jak již bylo výše uvedeno základem pro kvalitní díl je čistá forma s vyleštěným povrchem, proto se před laminací musí forma důkladně očistit. Na takto ošetřený povrch se houbou, nebo štětcem nanese jemná vrstva separátoru pro lehké vyjmutí. V případě potřeby se na separátor nanáší lak, nebo základová barva a forma se nechá na 2 hodiny zaschnout.

7.1.2 Příprava tkanin

Vzhledem na vysokou cenu těchto materiálů je velmi důležité, aby se tkaniny předem nastříhali do požadovaných tvarových rozměrů formy a zamezili tak zbytečnému plýtvání. Odolnost těchto tkanin sťažuje stříhání běžnými nůžkami, proto se musejí použít speciálně uzpůsobené se zoubkovým ostřím. Tkaniny se stříhají rozprostřené na čistém stole, aby nedošlo k znečištění jejich povrchu, co by mohlo způsobit vizuální vadu na finálním produktu, nebo zhoršit adhezi k pryskyřici.

7.1.3 Příprava epoxidové pryskyřice a tvrdidla

Proces přípravy směsi pryskyřice děláme v pořadí naposled, těsně před začátkem samotné laminace. Z pohledu časové náročnosti laminování zvolíme jedno z možných tvrdidel, v našem případě použijeme H 286, které nám umožňuje zpracování do doby bodu gelace v rozsahu 60 až 90 minut v závislosti na teplotě v místnosti. Obsah směsi epoxidové pryskyřice a tvrdidla volíme ve váhovém poměru 100:40 a následně dobře promícháme, aby došlo k homogennímu vytvrzení v celém systému. Pro lepší manipulaci při laminaci větších, nebo složitějších dílů je vhodné si směs připravovat na více etap.

7.1.4 Proces ruční laminace

Na povrch formy začneme štětcem nebo válečkem nanášet směs epoxidu, tak abychom dosáhli co možná nejvíce jednotné a rovnoměrné vrstvy. Následně na ni začneme klást první vrstvu skelné tkaniny, která bude plnit úkol výztuhy povrchové vrstvy laminátu. Pro kvalitní výrobek je nutné zbavit laminát všech vzduchových bublin. Toho docílíme, za pomoci štětce a gumových válečků, kterými vyvíjíme tlak na materiál a povrch formy. Po vyhlazení skelné tkaniny se jeví jako velmi transparentní. Do rohů a těžko dostupných míst se pro zpevnění ještě použije směs epoxidu a nasekaných skelných vláken.



Obr (32) Kladení vrstvy skelné tkaniny

Následně proces opakujeme položením tkaniny aramid-uhlík, zabezpečující vnitřní část výztuže. Opět povrch vyhladíme, zbavíme vzduchových bublin, případně seřezeme přesahující hrany. Na takto upravenou plochu se položí tvarově přizpůsobená 1,2 mm vysoká tvrzená polymerní pěna, plnící funkci jádra, která po prosycení a vytvrzení, dává materiálu dodatečnou tuhost při působení zatížení.



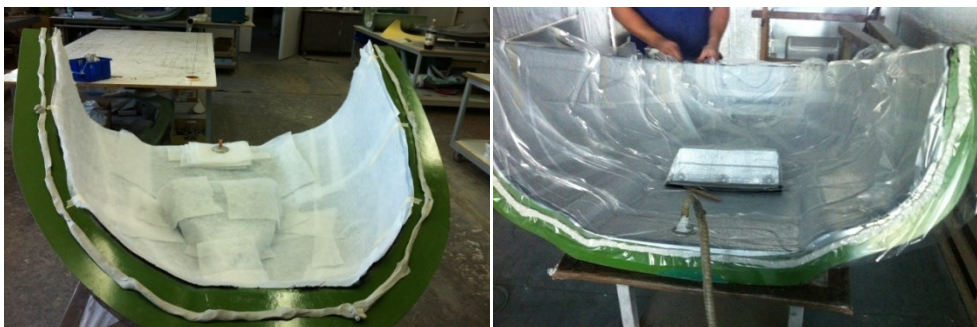
Obr (33) Kladení vrstvy tkaniny aramid-uhlík a pěnového jádra

V dalším kroku opět položíme vrstvu tkaniny aramid-uhlík, prosytíme ji epoxidovou směsí a vyhladíme. Na hrany a části dílu, které se později budou upravovat (řezat, brousit) se ještě nalaminuje pás uhlíkové tkaniny, která po vytvrzení zabezpečí, že se mohou opracovávat bez toho, aby se poškodili a došlo k šíření trhlin.



Obr (34) Kladení druhé vrstvy tkaniny aramid-uhlík a uhlíkového pásu

Následně se celý povrch formy pokryje perforovanou fólií, zabezpečující odvod přebytečné pryskyřice vlivem podtlaku. Povrch této fólie je speciálně upravený, aby se po vytvrzení laminátu dal bez problémů a jeho poškození odstranit. Přebytečný epoxid je stře-báván do buničité textilie, kterou nakonec pokryje finální nepropustná fólie, vzduchotěsně utěsněná po krajích formy tmelem a za pomoci ventilu je z formy odsávaný vzduch. Toto má dva významy, první, že laminát je chráněn proti vlhkosti, kyslíku, nebo prachu a dru-hý, že vlivem odsátí vzduchu, začne fólie vyvíjet tlak na horní vrstvu laminátu a zlepšuje tak jeho výsledné vlastnosti.



Obr (35) Utěsnění a odsátí vzduchu z formy

7.1.5 Vytvrzování vzorků

Po odsátí vzduchu a uplynutí doby zpracování směsi epoxidové pryskyřice, začíná v její struktuře probíhat reakce vytváření třírozměrné sítě. V tomto stavu se nechá laminát vytvrdit po dobu 12 hodin, následně je možné sundat fólii a vyjmout ho z formy. Laminát je již velmi odolný avšak pro úplné dotvrzení se umísťuje do temperační pece s teplotou 60 °C na dalších 12 hodin.

7.1.6 Dokončovací práce

Za dokončovací práce se považuje finální opracování plně vytvrzeného dílu, ořezávání hran, případně se do stěny vyřezávají potřebné otvory. Díky přidanému pásu uhlíkové tkaniny, nedochází k roztřepení vláken a následné delaminaci vrstev.

7.2 Příprava zkušebních těles

Postup výroby zkušebních těles je analogický jako při výše uvedené technologii laminování konkrétního dílu s rozdílem ploché formy a výsledným kompozitem ve tvaru desky pro lehčí rozřezání a použití při testování.

7.2.1 Podmínky vytvrzování

Testovací desky byly připraveny podle následujících parametrů:

- Deska bez temperace: zkušební deska byla po laminaci ponechána po dobu 12 hodin vytvrzovat při pokojové teplotě a dále se již netemperovala.
- Deska temperovaná na 60 °C: po laminaci byla rovněž ponechána 12 hodin k vytvrzení při pokojové teplotě a následně se ještě dalších 10 hodin temperovala v peci při 60 °C k úplnému dotvrzení.
- Deska temperovaná na 150 °C: stejně jako u předchozích případů se deska nechala vytvrdit při pokojové teplotě po dobu 12 hodin a následně byla další 3 hodiny temperovaná při teplotě 150 °C.

7.2.2 Příprava těles pro jednotlivé zkoušky

Podle výše uvedených podmínek byly připraveny testovací desky, které se následně nařezali úhlovou bruskou do požadovaných rozměrů podle jednotlivých metod.

Pro další metody byly rovněž dle stejných vytvrzovacích podmínek připraveny testovací tělesa samotné pryskyřice, které se následně vystavili expozici jednotlivých vlivů pro simulaci provozních podmínek produktu, ve kterých se běžně nachází:

- vystavení vlivům vnějšího prostředí (1 měsíc)
- expozice v prostoru motoru (1 měsíc)

8 POUŽITÉ ANALÝZY A METODY MĚŘENÍ

8.1 Termické analýzy

Jsou to metody měřící fyzikální a mechanické vlastnosti látek vlivem změny teploty v čase, při určených teplotních cyklech a atmosférických podmínkách, zaznamenávající změny pozorovaných veličin, které jsou typické pro každý materiál.

8.1.1 Diferenční skenovací kalorimetrie (DSC)

Metoda používající se k určení charakteristických teplot jako například teplota skelného přechodu T_g , teplota tání T_m , krystalinita, nebo stav vytvrzení. Princip této metody spočívá v porovnávání změny tepelného toku referenčního a měřeného vzorku při teplotním programu jejich rovnoměrného ohřívání a ochlazování. Výsledkem je rozdíl tepelných toků, na základě čeho se určí vlastnosti měřeného vzorku. Při měření rozeznáváme dva typy teplotních programů:

- Izotermní sken: během celého měření je v systému udržována konstantní hodnota teploty
- Dynamický sken: teplota se lineárně zvyšuje zvolenou rychlostí během celého měření.

DSC analýza

Měření se provádělo na přístroji Mettler Toledo DSC 1. Vzorky materiálu byly umístěny do hliníkových misek a vloženy spolu s referencí do píčky v prostředí inertního plynu dusíku N_2 . Nastavení bylo provedeno podle požadovaného režimu měření:

- Izotermický sken pro zjištění celkového tepla ΔH_{ISO} spolu s dynamickým pro určení residuálního tepla ΔH_{res} :
 - 1. temperace na 25 °C (1 minuta)
 - 2. izotermní sken 40 °C (90 minut)
 - 3. zchlazení na 25 °C (200 °C/minutu)
 - 4. dynamický sken od 40 °C do 250 °C (20 °C/min)
 - 5. zchlazení na 25 °C
- Dynamický sken pro zjištění celkového tepla ΔH_{DYN} :
 - 1. temperace na 25 °C (1 minuta)
 - 2. dynamický sken od 25 °C do 250 °C (20 °C/minutu)
 - 3. zchlazení na 25 °C (200 °C/minutu)
 - 4. dynamický sken od 25 °C do 250 °C (20 °C/minutu)
 - 5. zchlazení na 25 °C

- Dynamický sken pro zjištění residuálního tepla ΔH_{res} testovacích vzorcích:
 - 1. temperace na 25 °C (1 minuta)
 - 2. dynamický sken od 25 °C do 250 °C (20 °C/minutu)
 - 3. zchlazení na 25 °C (200 °C/minutu)
 - 4. dynamický sken d 25 °C do 250 °C (20 °C/minutu)
 - 5. zchlazení na 25 °C



Obr (36) Zařízení Mettler Toledo DSC 1

Cíl metody

Cílem této metody je určení stupně konverze a vytvrzovací reakce k porovnání mezi jednotlivými vzorky pryskyřice temperovanými při různých teplotách.

8.1.2 Dynamická mechanická analýza (DMA)

Je považována za jednu z nejcitlivějších metod k určování mechanických charakteristik látky, sledováním viskoelastického chování při oscilačním zatěžování. Princip metody spočívá v působení dvou protichůdných momentů, které působí na testovací těleso upnuté mezi ramena zařízení umístěné v temperančním prostředí. Vlivem těchto sil dochází k deformacím charakterizovanými závislostí modulu a ztrátového úhlu na změnu teploty a času. Pomocí DMA lze určit například teplotu skelného přechodu, teplotu tání, mechanické ztráty, krystalinitu, bod zesíťování a stárnutí materiálu.

DMA analýza

Pro naše měření budeme určovat mechanické vlastnosti vzorků a teplotu skelného přechodu T_g ze závislosti teploty na modulu pružnosti E' a ztrátovém uhlu $\tan \delta$.

- Modul pružnosti E' , zjištění teploty skelného přechodu z elastického modulu určíme z poklesu jeho závislosti na teplotě. Při poklesu modulu začne materiál ztrácet svoji pevnost a není schopen odolat zatížení, aniž by se projevila určitá strukturální deformace.
- Ztrátový uhel $\tan \delta$, při této metodě je teplota skelného přechodu určena dosažením maximální hodnoty podílu elastického a viskózního modulu látky, graficky též znázorněná jak maximální pík v závislosti na teplotě.

Měření se provádělo na zařízení DMA DX 4T při nastavení vstupních parametrů:

- Rozměry testovacích těles: 50x5x0,3 (mm)
- Frekvence: 1 Hz
- Amplituda: 5 μm
- Režim:
 - konstantní teplota po dobu 2 minut
 - zvyšování teploty rychlostí 3 $^{\circ}\text{C}/\text{minutu}$
 - dosažení teploty 300 $^{\circ}\text{C}$
 - zchlazení
- Počet měření: 1 pro každý typ dotvrzení (bez temperace, temperace při 60 $^{\circ}\text{C}$, temperace při 150 $^{\circ}\text{C}$)



Obr (37) Zařízení DX 04T DMA

Cíl metody

Metoda nám pomůže charakterizovat mechanické vlastnosti měřených vzorků při tepelné zatěžování, ze kterého rovněž dokážeme určit teplotu skelného přechodu epoxidu. Porovnání vlastností mezi různě temperovanými vzorky a určení mechanického stupně konverze.

8.2 Spektrální metody

Jsou to metody nedestruktivního charakteru, zabývající se studiem interakcí látek s elektromagnetickým zářením. Z množství absorbovaného nebo emitovaného záření lze získat údaje o jednotlivých energetických hladinách a z těchto dat následně vyvodit informace o struktuře molekul.

8.2.1 Infračervená spektroskopie s Fourierovou transformací FTIR

Podstatnou této metody je vystavení měřené látky infračervenému záření, kde vlivem a podle způsobu absorpce energie molekul dochází k změně jejich rotačních anebo vibračních stavů charakterizovanými jejich rotačními či vibračními pásy. Tyto hodnoty jsou pak přiřazeny jednotlivým funkčním skupinám podle svých vlnočtů, z čeho dokážeme určit strukturu látky.

Největší použití této konkrétní metody je pro identifikační a strukturní analýzy organických i anorganických sloučenin.

FTIR analýza

Pro měření byl použitý FT-IR spektrometr Nicolet 6700, technikou ATR (Zeslabená úplná reflektance). Jako testovací vzorky byly použity čisté nevyztužené epoxidové pryskyřice vystaveny různé expozici.

Vstupní parametry zařízení při měření:

- Rozměry testovacích těles: 30x30 (mm)
- Rozsah vlnových délek: 700 až 4000 λ

Pro analýzu použijeme blízké IR určené vlnočtem 700 až 4000 cm^{-1} . V tomto spektru se nachází méně překrývajících se pásem a pro identifikaci epoxidů je tedy mnohem užitečnější než NIR se spektrem 4000 až 7500 cm^{-1} .



Obr (38) Spektrometr Nicolet 6700

Cíl metody

Cílem této metody je charakterizovat složení testovaného materiálu a určit změny ve struktuře v závislosti na expozici, které byl materiál vystaven při různých teplotách vytvrzení.

8.3 Statické krátkodobé zkoušky

Patří mezi nejrozšířenější zkoušky mechanických vlastností materiálu, při kterých dochází ke krátkodobým namáháním do doby deformace, porušení, nebo destrukce.

8.3.1 Tahová zkouška

Základní metoda, při které vlivem vzdalujících se ramen zařízení dochází k deformaci tělesa. Změna jeho rozměrů vede k vyvození úměrnému napětí až do doby celkové destrukce. Vztah mezi napětím a deformací popisuje elastické chování materiálu, které lze podle Hookova zákona určit jako modul pružnosti E (pro oblast malých deformací).

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \text{ [Pa]} \quad (11)$$

Tahová analýza

Analýza tahovou zkouškou byla prováděna podle normy ČSN EN ISO 527-1 na trhacím zařízení GALDABINI QUASAR 25.

		Dimensions in millimetres	
		Type 2	Type 3
L_3	Overall length	≥ 250	≥ 250
L_2	Distance between end tabs	—	150 ± 1
b_1	Width	$25 \pm 0,5$ or $50 \pm 0,5$	$25 \pm 0,5$ or $50 \pm 0,5$
h	Thickness	2 to 10	2 to 10
L_0	Gauge length (recommended for extensometers)	50 ± 1	50 ± 1
L	Initial distance between grips	150 ± 1	136 (nominal)
L_T	Length of end tabs	—	≥ 50
h_T	Thickness of end tabs	—	1 to 3
D	Diameter of centring holes	$3 \pm 0,25$	$3 \pm 0,25$

NOTE — Requirements on specimen quality and parallelism are given in clause 6.

Tab (7) Specifikace zkušebních těles podle normy ČSN EN ISO 527-1

V důsledku vysoké tahové pevnosti připravených vzorků a jejich hladkému a tvrdému povrchu, nebylo při měření možné materiál přetřhnout a tím získat potřebné údaje k jeho vyhodnocení.

8.3.2 Ohybová zkouška

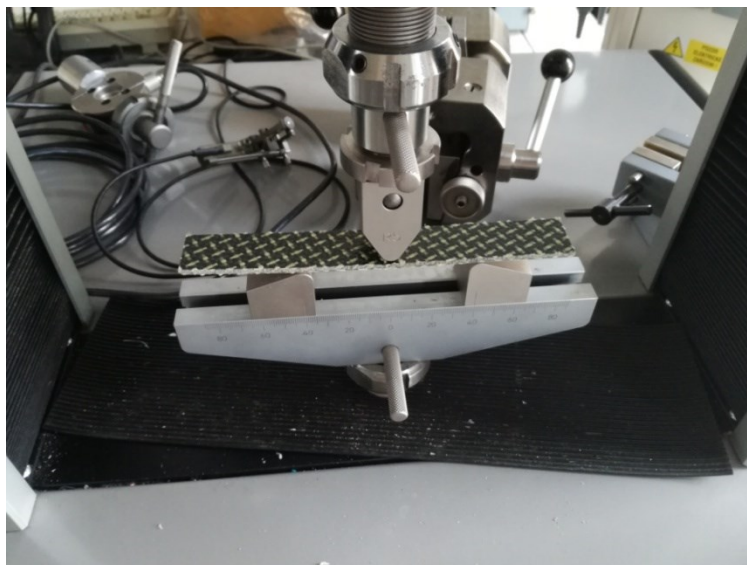
Metoda vhodná pro zkoušení zejména konstrukčních materiálů, které jsou v tomto ohledu často namáhány. Používá se zejména pro stanovení modulu pružnosti, který se odečte ze směrnice prohnutí materiálu při různých zatíženích. Nejběžnější je tříbodový ohyb, kde se těleso umístí na dvě podpěry a v jeho středu je zatěžován silou.

Analýza ohybem

Stejně jako u předchozí metody se pro určení mechanických vlastností zkušebních těles použilo zařízení GALDABINI QUASAR 25 s přestavením programu na test tříbodového ohybu podle normy ČSN EN ISO 14125, která určuje ohybové vlastnosti reaktoplastických kompozitů vyztužených vlákny.

Vstupní parametry zařízení:

- Rozměry testovacích těles: 150x24x0,3 (mm)
- Zkušební rychlost ramene: 20 mm/minutu
- Vzdálenost ramen: 80 mm
- Počet měření: 7 pro každý typ temperace



Obr (39) Zkouška ohybem na zařízení GALDABINI QUASAR 25

Cíl metody

Požadovaným výsledkem této metody je určit závislost síly, kterou budeme působit na testovací tělesa a dráhy kterou urazí rameno do doby jeho zhroucení. Z naměřených hodnot se následně dopočítá modul pružnosti, napětí v ohybu při porušení a relativní prodloužení, ze kterých se odvodí porovnání mechanických vlastností mezi jednotlivými vzorky.

8.3.3 Zkouška tvrdosti

Tvrdotost obecně definujeme jako odolnost materiálu proti průnikům tvrdšího tělesa vztahující se především na povrch materiálu. Jedná se o rychlou, jednoduchou a nedestruktivní metodu, přičemž hloubka vtačení určuje míru tvrdosti.

Analýza tvrdosti

Pro analýzu byla použita metoda Shore. Je to nejrozšířenější metoda dělí se podle tvrdosti měřeného materiálu na měkčí (Shore A) a tvrdší (Shore D), lišící se tvarem vtačovací hrotů. Vzhledem na charakter měřeného materiálu byla použita metoda Shore D.

Vstupní parametry zařízení:

- Rozměry testovacích těles: 50x50x6 (mm)
- Teplota v místnosti při měření: 23,4 °C
- Doba zatížení: 15 sekund
- Počet měření: 5 pro každý typ temperace



Obr (40) Zkouška tvrdosti na zařízení BAREISS
BS61-II

Cíl metody

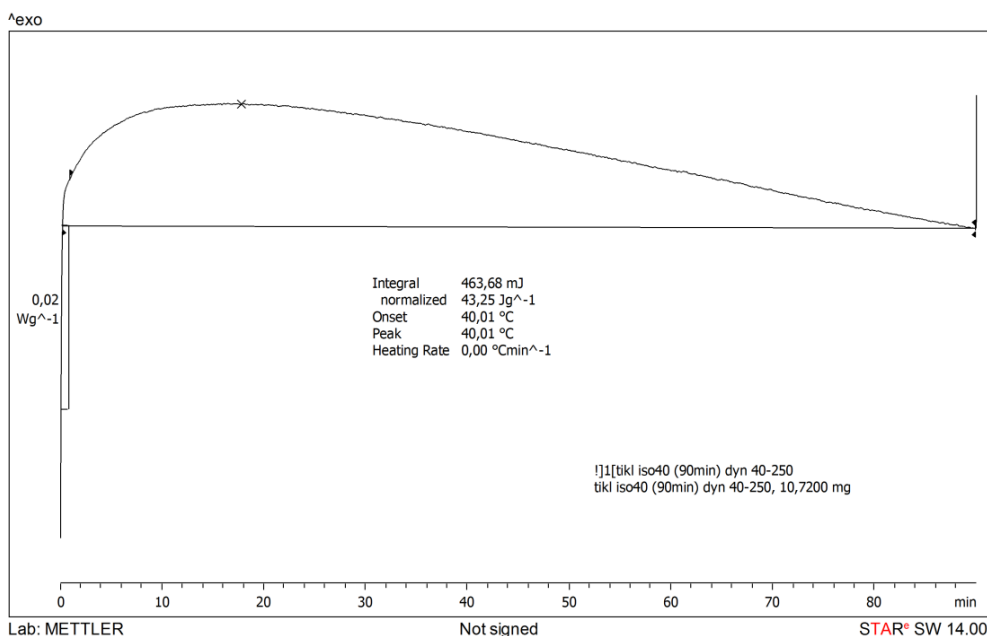
Vyhodnocení této metody přispěje k určení celkových výsledných mechanických vlastností materiálu v závislosti na stupni vytvrzení.

9 VÝSLEDKY A VYHODNOCENÍ MĚŘENÍ

V této části práce jsou uvedeny výsledky a grafické vyhodnocení jednotlivých měřících metod.

9.1 Výsledky DSC

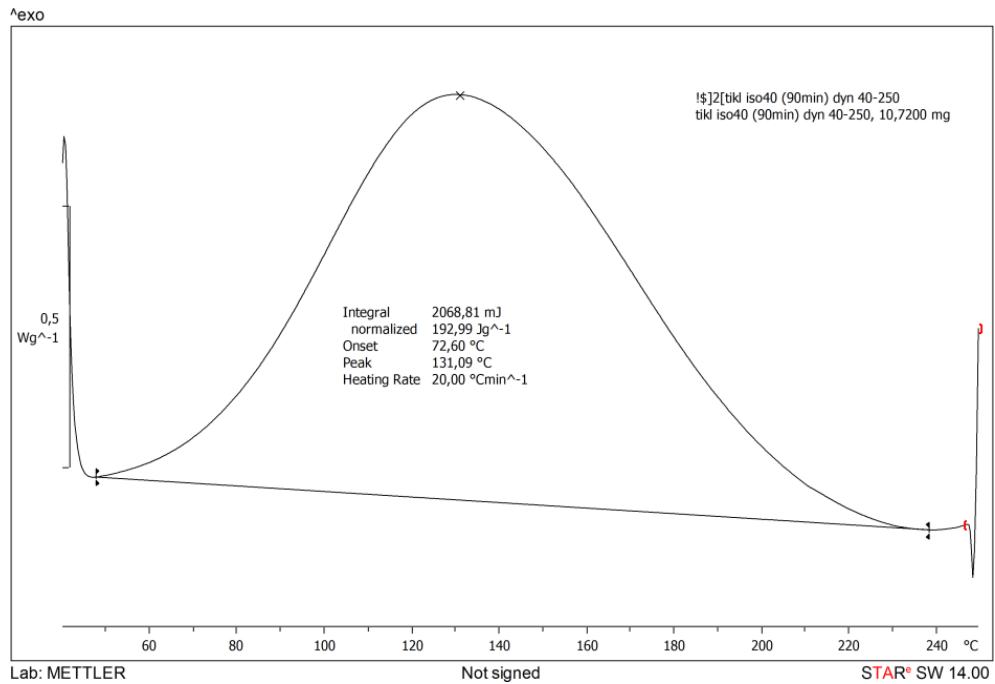
V souladu s předchozím odstavcem (4.4.1) jsme pro stanovení stupně konverze α a určení rychlosti reakce ($d\alpha/dt$) provedli měření charakterizující celkové teplo reakce ΔH_{ISO} při vytvrzení zkoumané pryskyřice.



Obr (41) Graf DSC- izotermního měření celkového tepla reakce ΔH_{ISO}
(40°C-90 minut)

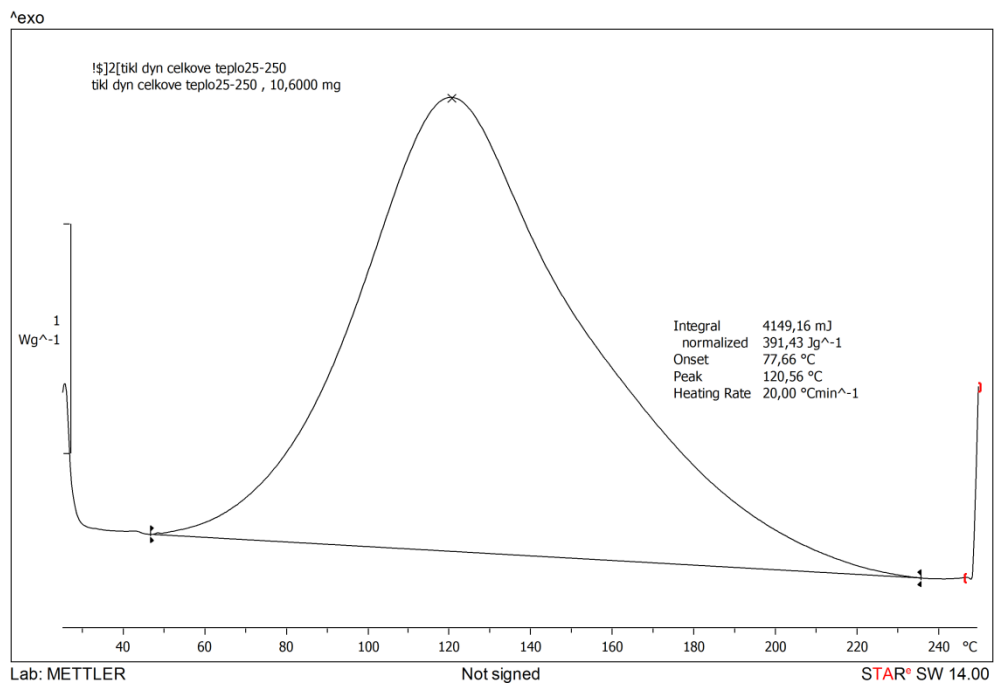
Na obrázku (41) je vidět že se nám nepodařilo ani po několik opakovaných měření a změn nastavení DSC zachytit počátek reakce. Příčina této ztráty je způsobena vysokou reaktivitou látek při smíchání epoxidu a tvrdidla. Další možné ztráty by mohli být způsobeny při ustalování DSC, nebo v důsledku jeho citlivosti.

Z výše uvedených důvodů se nám nepodařilo stanovit celkové teplo reakce pro izotermní měření, nic méně pro porovnání s dynamickým měřením budeme pokračovat v hodnocení.



Obr (42) Graf DSC- dynamického měření residuálního tepla ($25^{\circ}\text{C} - 250^{\circ}\text{C}$) izotermního skenu

Pro určení residuálního tepla ΔH_{res} byl po izotermním měření ještě proveden následně dynamický sken.



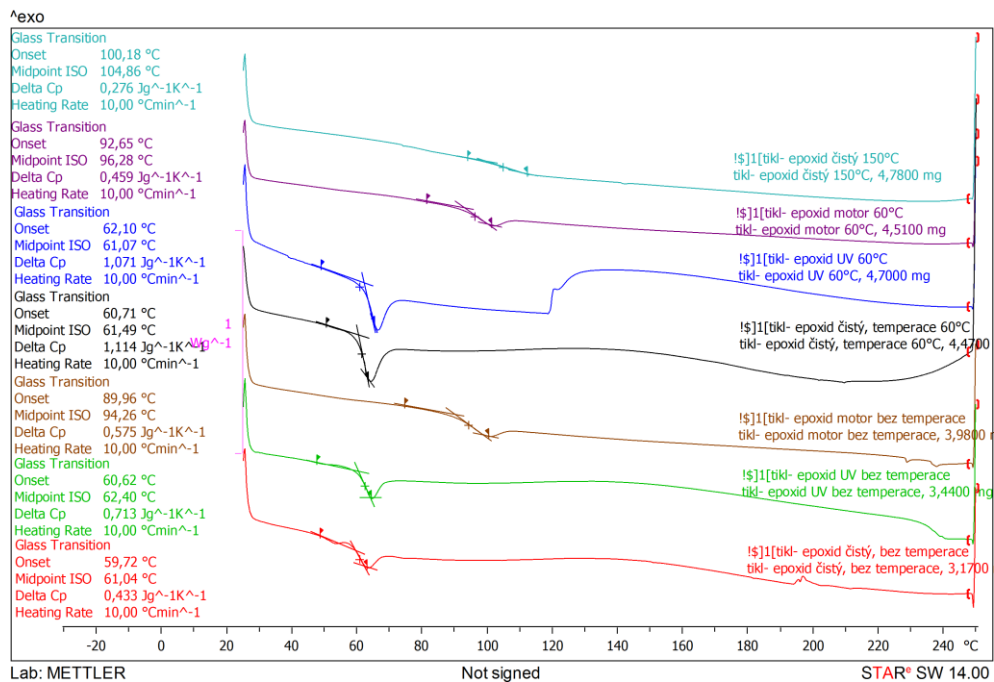
Obr (43) Graf DSC- dynamického měření ($25^{\circ}\text{C} - 250^{\circ}\text{C}$)

Z důvodu nezachycení průběhu uvolňování tepla při reakci izotermního měření budeme celkové teplo dynamického měření brát jako určující.

Měření	Celkové teplo ΔH_{ISO} [J/G]	Reziduální teplo ΔH_{RES} [J/G]	$\Delta H_{ISO} + \Delta H_{RES}$ [J/g]	Celkové teplo ΔH_{DYN} [J/g]
Dynamický sken	/	/	/	391,4
Izotermický sken 40°C	43,3	193,0	236,2	/

Tab (8) Reakční tepla čisté pryskyřice pro izotermní a dynamické měření

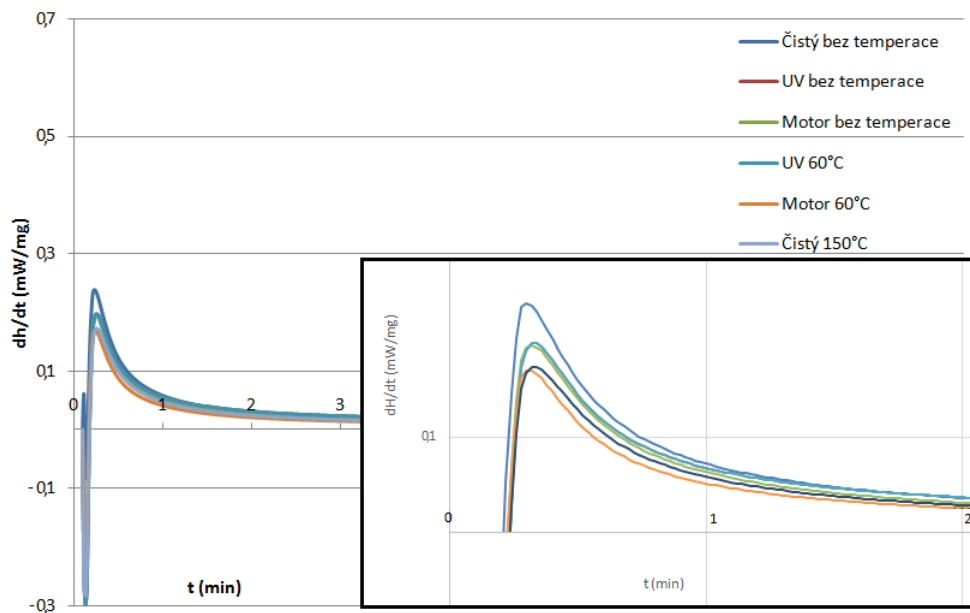
Podle výše uvedených grafů (obr. 41 až 43) a vyhodnocených hodnot (tab. 8) jsme z izotermického a dynamického skenu byli schopni určit reakční tepla pro čistou pryskyřici. Porovnáním celkového tepla izotermního a dynamického měření vidíme značný rozdíl v hodnotách způsobený již zmiňovaným nezachycením celého průběhu reakce. Rozdíl těchto tepel je až 155,2 J/g.



Obr (44) Graf DSC- dynamický sken pro určení teploty skelného přechodu v závislosti na teplotě vytvrzení

Porovnáním teplot skelného přechodu jednotlivých vzorků je zřejmé, že nejnižší hodnotu T_g charakterizující stupeň vytvrzení má čistá pryskyřice bez temperace spolu s temperovaným vzorkem na 60 °C, rovněž jako vzorky vystavené expozici na slunci s i bez temperace. Posunutí T_g je výrazné u vzorků vystavených expozici v prostoru motoru a největší posunutí teploty skelného přechodu bylo zaznamenáno na vzorku temperovaném

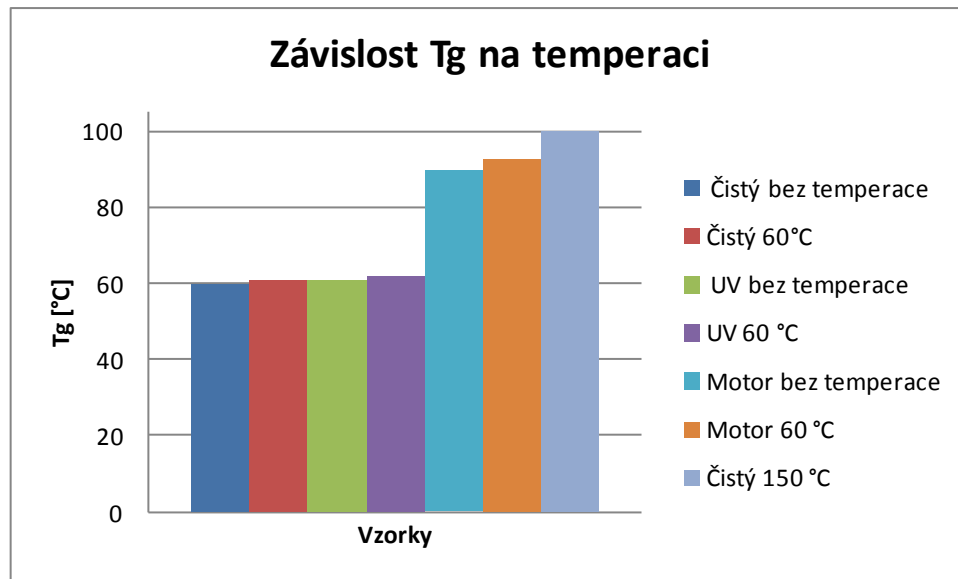
při 150 °C. V následujícím měření stupně konverze byl tento vzorek díky nulové zbytkové entalpii u dynamického skenu vyhodnocen jako úplně dotvrzený, co určuje jeho teplotu T_g za konečnou. Z toho se dá usoudit, že ostatní vzorky nebyli dostatečně dotvrzené. Podobnost vzorků UV a bez expozice při obou teplotách znamená, že teplota při 60 °C nemá velký význam na změnu struktury, naopak při expozici vzorků v motorovém prostoru došlo díky jeho teplotě k dotvrzení avšak ani to nebylo dostatečné.



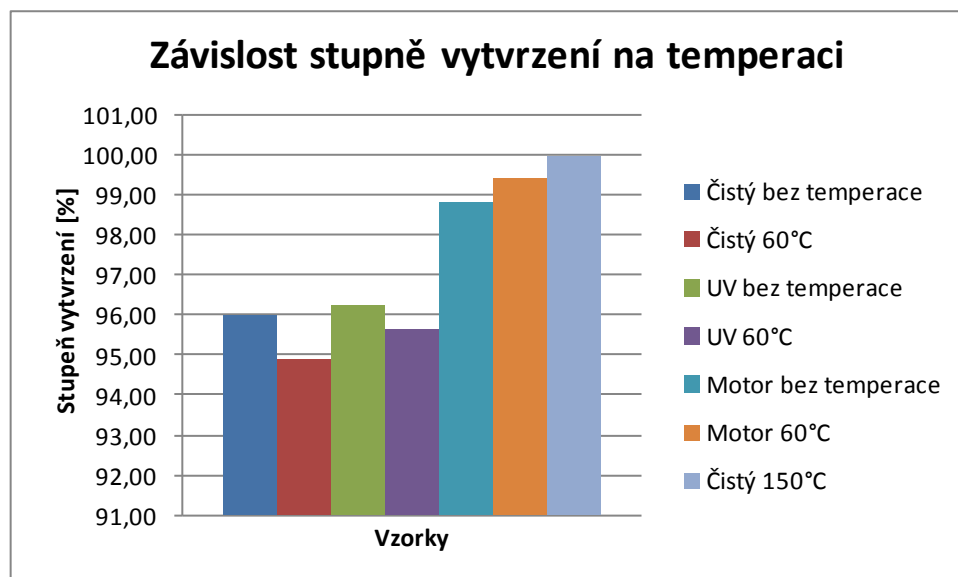
Obr. (45) Dynamické skeny zbytkové entalpie pro různé dotvrzení

Vzorek	T_g [°C]	Zbytková entalpie ΔH_{RES} [J/G]	Stupeň vytvrzení [%]
Čistý bez teperace	59,72	15,73	95,98
Čistý 60°C	60,71	19,9	94,92
UV bez teperace	60,62	20,2	96,24
UV 60°C	62,1	24,4	95,63
Motor bez teperace	89,96	4,5	98,85
Motor 60°C	92,65	2,1	99,46
Čistý 150°C	100,18	0	100,00

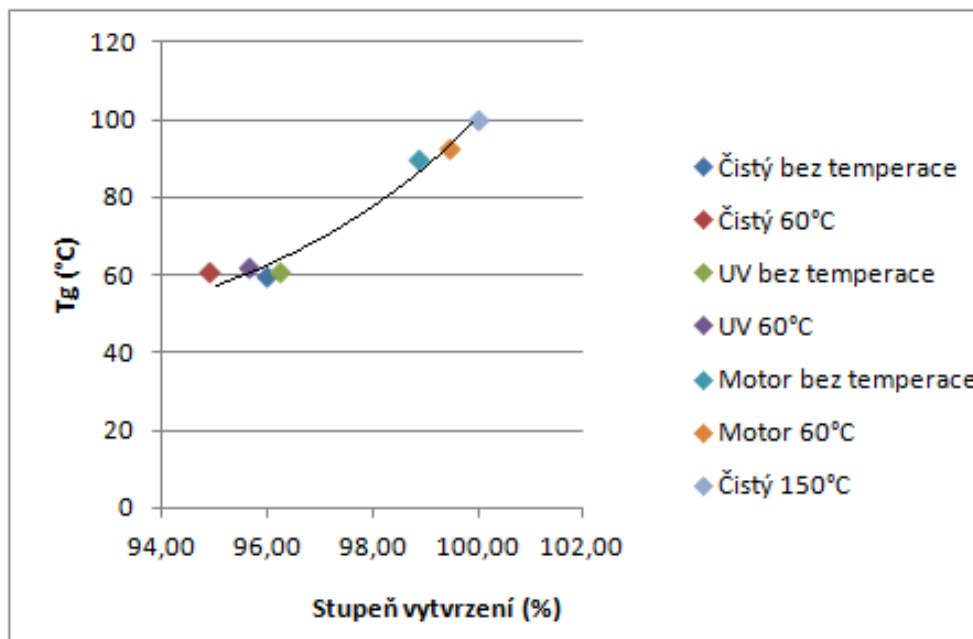
Tab (9) Tabulka hodnot určení stupně vytvrzení v závislosti na T_g a ΔH_{RES}



Obr. (46) Závislost teploty skelného přechodu na temperaturaci



Obr. (47) Závislost stupně vytvrzení na temperaturaci



Obr. (48) Závislost teploty skelného přechodu na stupni vytvrzení

Z příslušných hodnot teplot skelného přechodu T_g a stanovených hodnot stupně vytvrzení podle zbytkové entalpie jednotlivých dynamických měření vzorků pryskyřice dotvrzovaných při různých teplotách jsme dokázali jejich závislost stoupavého charakteru podle teploty, při které byli dotvrzovaní. Tato závislost je znázorněná na obrázku 45 a vypočtené hodnoty stupně vytvrzení podle vzorce (1) je zobrazeno v tabulce 9. Podle dostupné literatury pro vytvrzování epoxidových pryskyřic musí být pro dosažení maximálního dotvrzení, vytvrzovací teplota minimálně o 10 až 20 °C bodem teploty skelného přechodu z čeho vyplývá, že teplota pro dotvrzení námi měřené pryskyřice, které maximální T_g bylo při sto procentním vytvrzením stanoveno na 100,18 °C je asi 80 °C.

Stejně jako teplota dotvrzení je důležitý i čas, po který výrobek vystavujeme dotvrzovací teplotě. Podle teploty může chemická reakce dotvrzování epoxidů probíhat velmi pomalu a trvat i desítky hodin. Proto se při dotvrzování využívá závislosti teploty na čase a doba vytvrzení se výrazně zkracuje. Toto dokazuje náš vzorek temperovaný na 150 °C po dobu 3 hodin, který má T_g 100 °C a vzorkem temperovaný při teplotě 60 °C po dobu 10 hodin, který má T_g 60 °C.

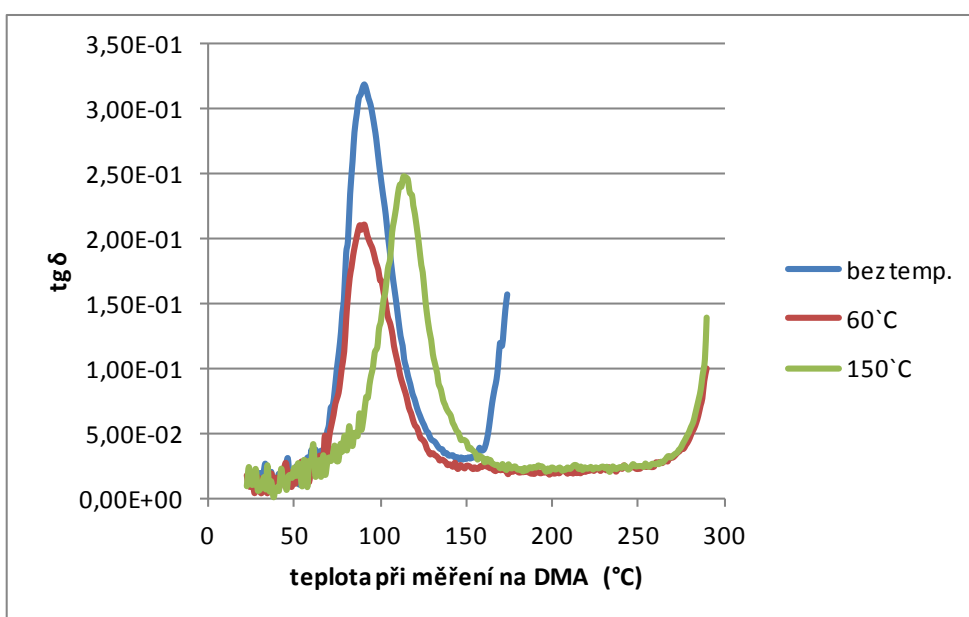
9.2 Výsledky DMA

Výsledkem hodnocení závislostí DMA je určení skelného přechodu a hodnotu modulu pružnosti kompozitního materiálu charakterizující jeho mechanické vlastnosti.

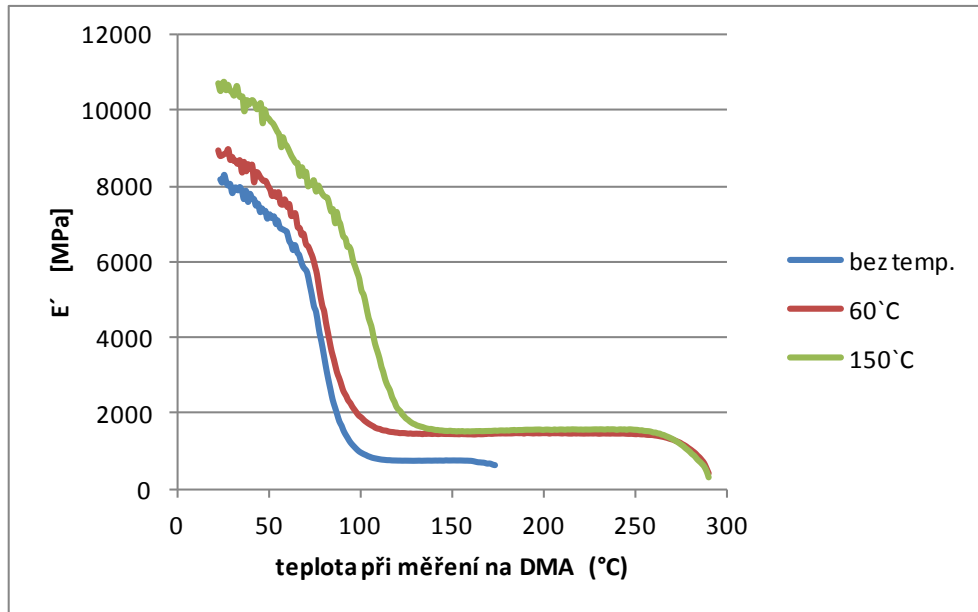
Měření	Teplota skelného přechodu T _g [°C]	Modul pružnosti E' [MPa]
Epoxid bez temperace	77	8314
Epoxid temperovaný při 60°C	75	8917
Epoxid temperovaný při 150°C	101	10708
Epoxid- porovnání	250	28235

Tab (10) Tabulka porovnání hodnot teploty skelného přechodu a modulu

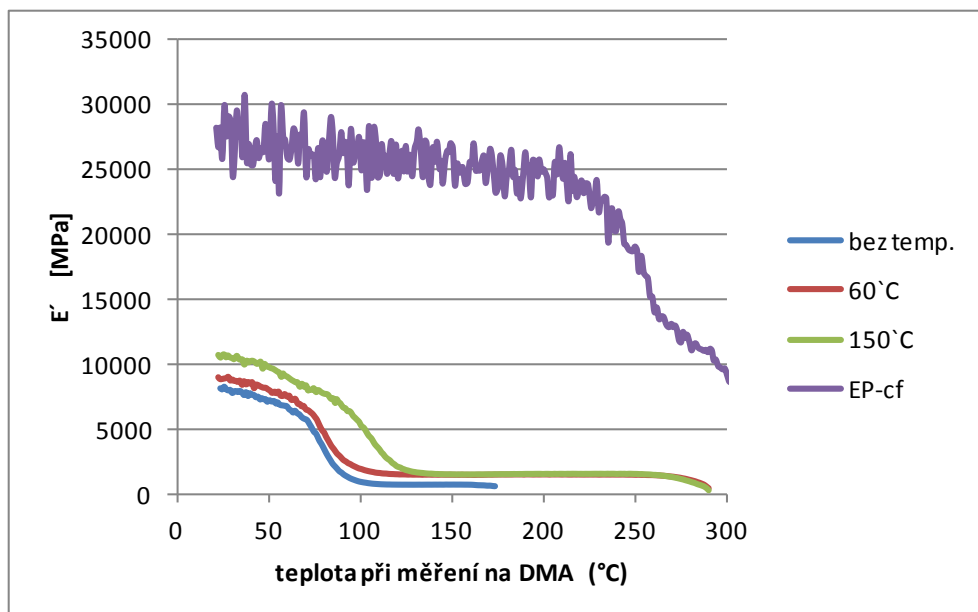
Stupeň dotvrzení pro jednotlivé vzorky může být kromě metody DSC stanoven i z naměřených hodnot modulů pružnosti (Tab. 10), jejich porovnáním s úplně dotvrzeným vzorkem. Na základě předchozí metody DSC byl jako úplně dotvrzený, hodnocený vzorek s temperací při 150 °C. Potom podle vzorce (10) určíme stupeň vytvrzení pro vzorek temperovaný při 60 °C na 83 % a pro vzorek bez temperace na 77 %.



Obr (49) Graf DMA- srovnání teplot skelného přechodu různě vytvrzených epoxidových matric s vlákny



Obr (50) Graf DMA- srovnání modulů pro různě vytvrzené epoxidové matrice s vlákny



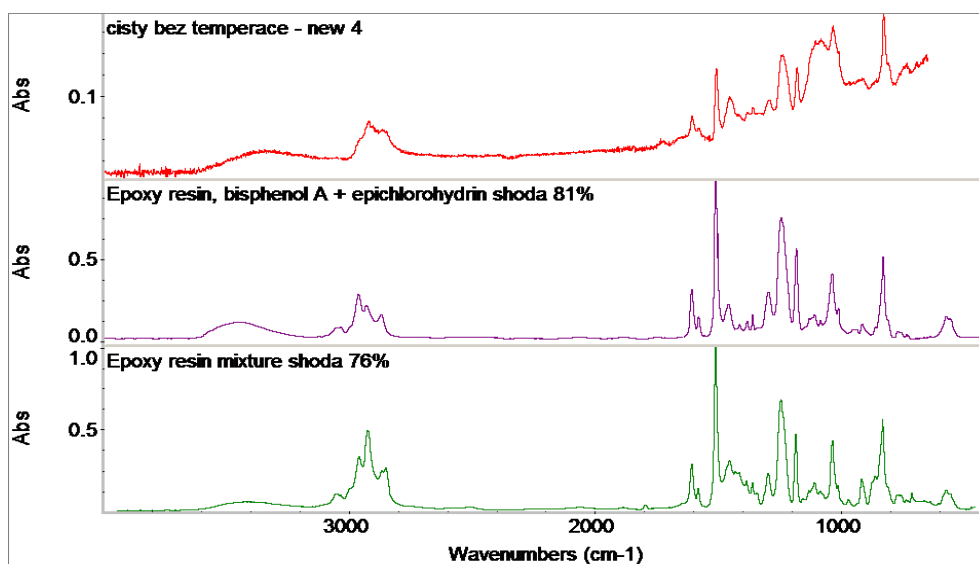
Obr (51) Graf DMA- srovnání modulů testovaných vzorků a epoxidu pro obdobné použití

Z dalších vyhodnocení výsledků plyne, že matrice temperovaná při vyšší teplotě má i vyšší teplotu skelného přechodu což potvrzuje i zjištění z předchozí metody na DSC. Současně při vyšší teplotě dotvrzení kompozit dosahuje i lepších mechanických vlastností,

to je dáno strukturou zesíťování. Nicméně výsledné hodnoty testovacích těles byly porovnávány s obdobným měřením na DMA pro epoxidovou pryskyřici rovněž určenou na letecké aplikace a výsledky hodnot byly diametrálně vyšší než námi naměřené hodnoty. Rozdíl hodnot modulů mezi naším nejpevnějším vzorkem a porovnávaného měření bylo až 17 527 MPa a teplota skelného přechodu byla vyšší až o 150 °C.

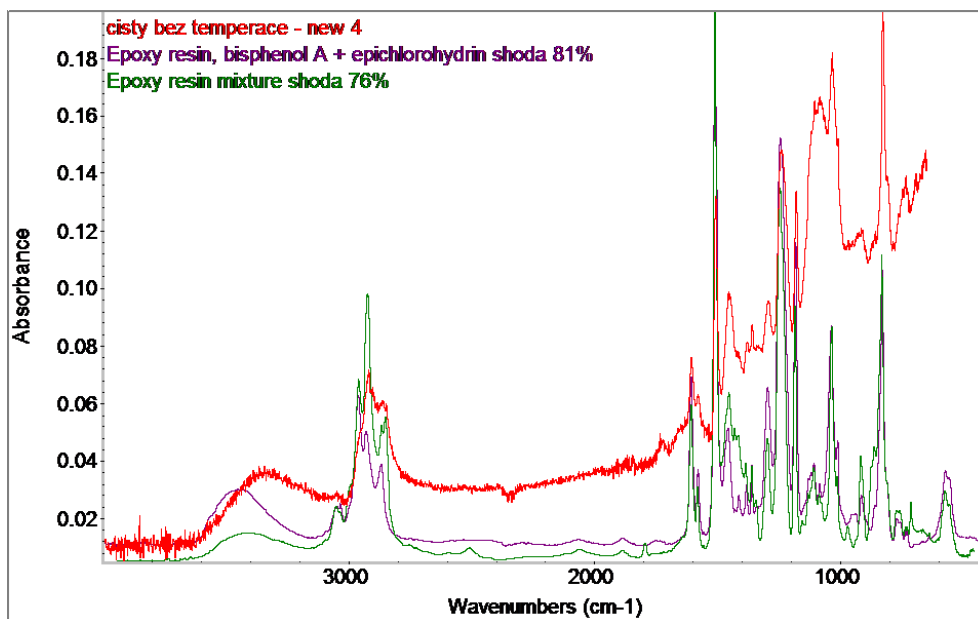
9.3 Výsledky FTIR

Z důvodu výsledku předchozí metody a podezření zda se skutečně jedná o epoxidovou pryskyřici byly vzorky podrobeny metodě FTIR.



Obr (52) Graf FTIR- vyhodnocení shody testovacích vzorků

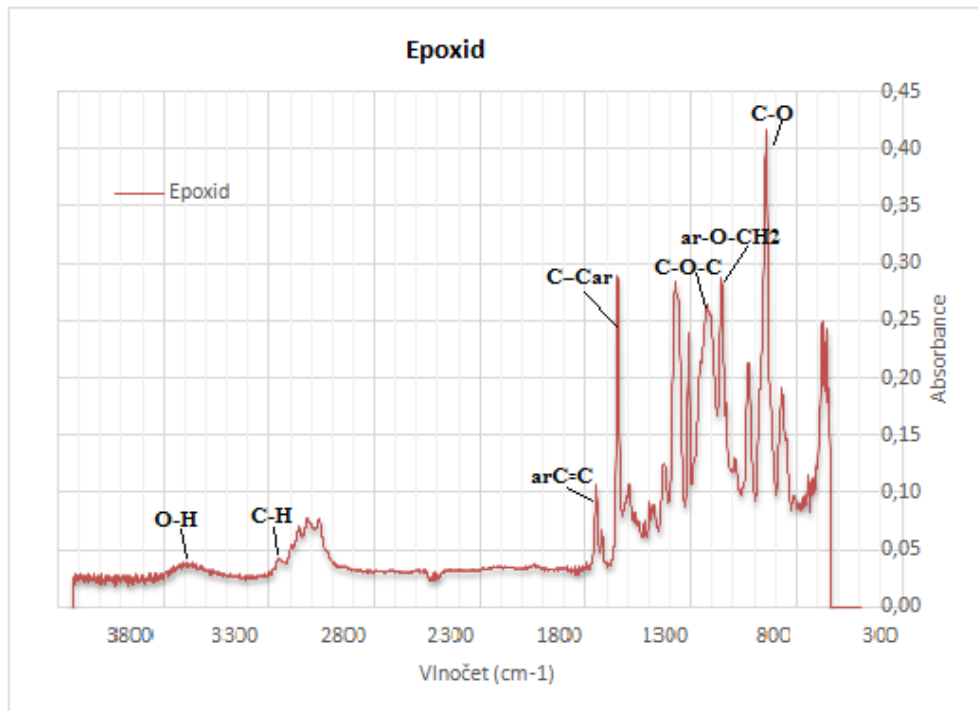
Při porovnání našeho vzorku čisté pryskyřice a spektra epoxidových skupin bylo prokázáno, že shoda námi dodané pryskyřice avizující obsah bisfenolu A + epichlorhydrinových skupin byla prokázána na 81 % a obsah dalších skupin epoxidové pryskyřice na 76 %. Z těchto výsledků můžeme potvrdit, že se skutečně jedná o epoxidovou pryskyřici.



Obr (53) Graf FTIR- porovnání shody testovacích vzorků

Vyhodnocení epoxidové pryskyřice FTIR

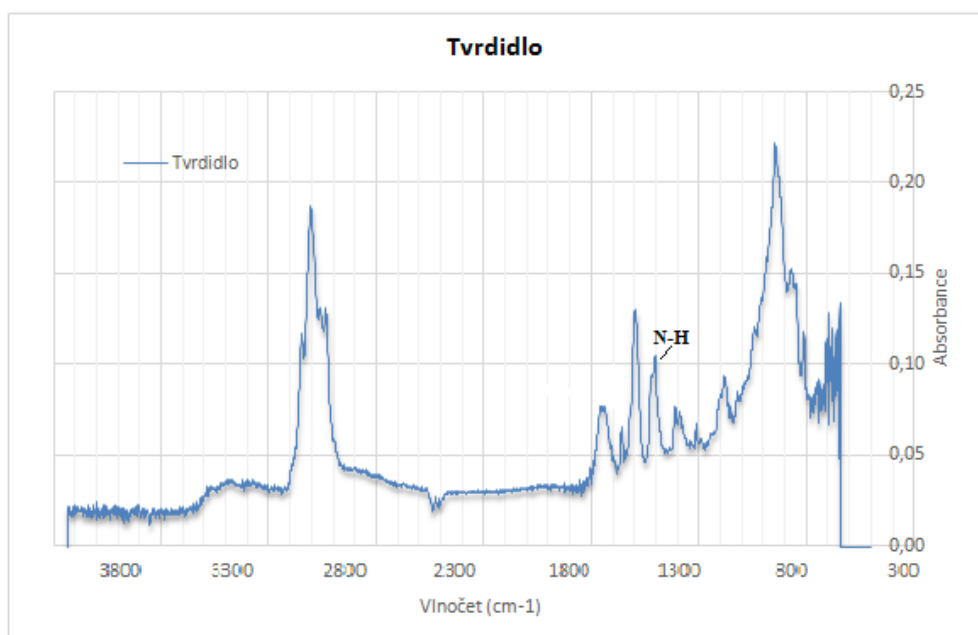
Jak již bylo uvedeno v teoretické části, základním prvkem pro tří rozměrnou síť je epoxidový kruh tvořený dvěma atomy uhlíku a jedním kyslíkem. Podle výše uvedeného grafu měření pro čistou nevytvrzenou pryskyřici vidíme jeho zastoupení při dvou charakteristických vlnočtech. První na hodnotě 915 cm^{-1} , který je přiřazený C-O deformaci oxiránové skupiny, kde jeho vysoký pík poukazuje na jeho vysokou koncentraci a druhý je umístěn na vlnočtu 3050 cm^{-1} , charakterizující napětí C-H na methylenové skupině epoxidu. Jeho pík není tak výrazný z důvodu silné absorpce hydroxylových skupin O-H, vznikajících při další reakci epoxidových skupin následující po jejich přípravě, kondenzací bisfenolu A a epichlorhydrinu. Tyto skupiny se nacházejí na vlnočtu 3500 cm^{-1} určeny širším píkem charakterizujícím přítomnost dimerů, nebo vysokomolekulárních látek. Pík odpovídající éterové vazbě C-O-C najdeme na vlnočtu 1036 cm^{-1} .



Obr (54) Graf FTIR- vyhodnocení epoxidové směsi

Vyhodnocení diaminů FTIR

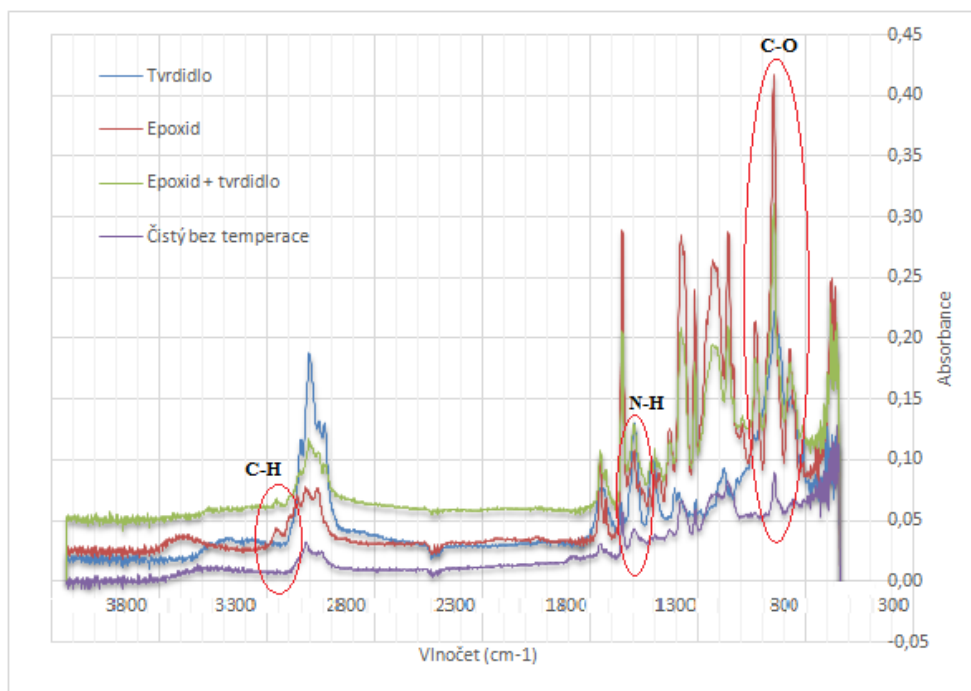
Hlavními charakterizujícími absorpcemi pro aminy jsou deformace N-H vazby nacházející se pro primární aminy na vlnočtu 1500 až 1650 cm⁻¹ a pro sekundární 1490 až 1580 cm⁻¹, které je v důsledku překrytí vlnových délek obvykle slabý a nevýrazný.



Obr (55) Graf FTIR- vyhodnocení diaminového tvrdidla

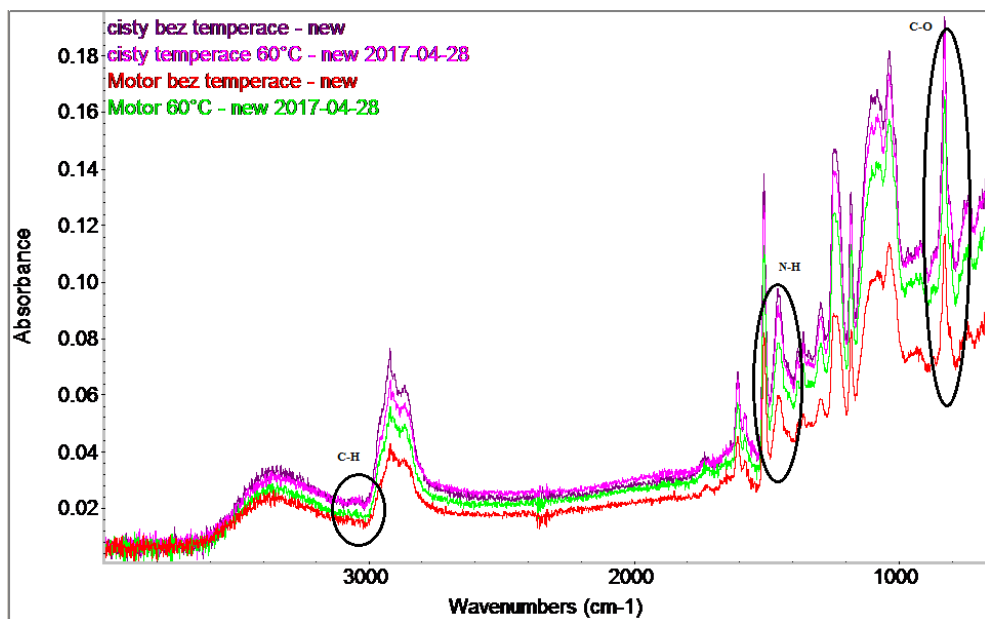
Vyhodnocení vytvrzování FTIR

Jak již bylo zmíněno v teorii, vytvrzení diaminu probíhá v dvou krocích. Nejprve epoxidová skupina reaguje s primárním aminem, čím se získá sekundární, který v druhém kroku reaguje s jinou epoxidovou skupinou. Vzhledem k těmto chemickým reakcím lze celý proces sledovat vývojem epoxidových skupin, primárních aminů nebo v určitém rozsahu na sekundárním aminu. Při samotném vytvrzování tedy dochází k poklesu píku pro epoxidové skupiny na CH_2 a N-H skupin. Skupina O-H v průběhu vytvrzování vzrůstá, avšak tento pás není vhodný k vyhodnocování díky nízkému poměru signál/šum. Rovněž vyhodnocení dvou pásem aminů při vytvrzování je náročný pro vyhodnocení v důsledku jejich překrytí při transformaci primárních a sekundárních aminů na terciální.

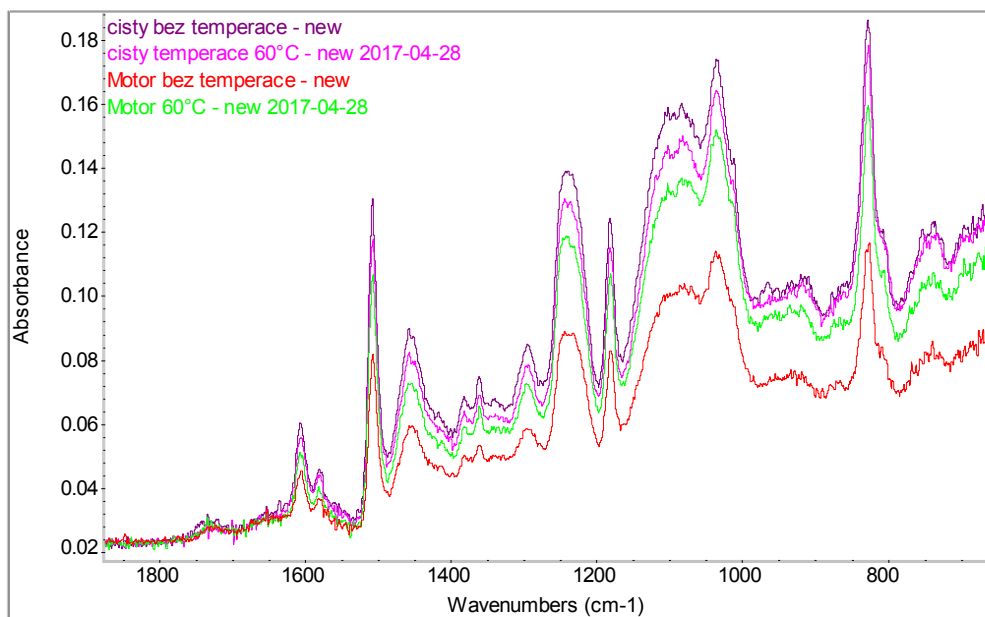


Obr (56) Graf FTIR- vyhodnocení jednotlivých složek a epoxidové směsi

Z následujících grafů (Obr. 55, 56) vyhodnocujících vzorky bez temperace, s temperací a vzorky vystavené expozici motorového prostoru můžeme vidět, že s rostoucí teplotou do-tvrzení, klesá pík C-H epoxidových skupin zanikající při otevírání kruhů při vytvrzení. Stejný stav pozorujeme u píku charakterizujícím aminové skupiny. Hodnota dotvrzení pro vzorky bez temperace a s temperací na 60 °C je relativně stejná, liší se jen třetí vzorek, kterého vyšší dotvrzení je díky teplotě z motoru.

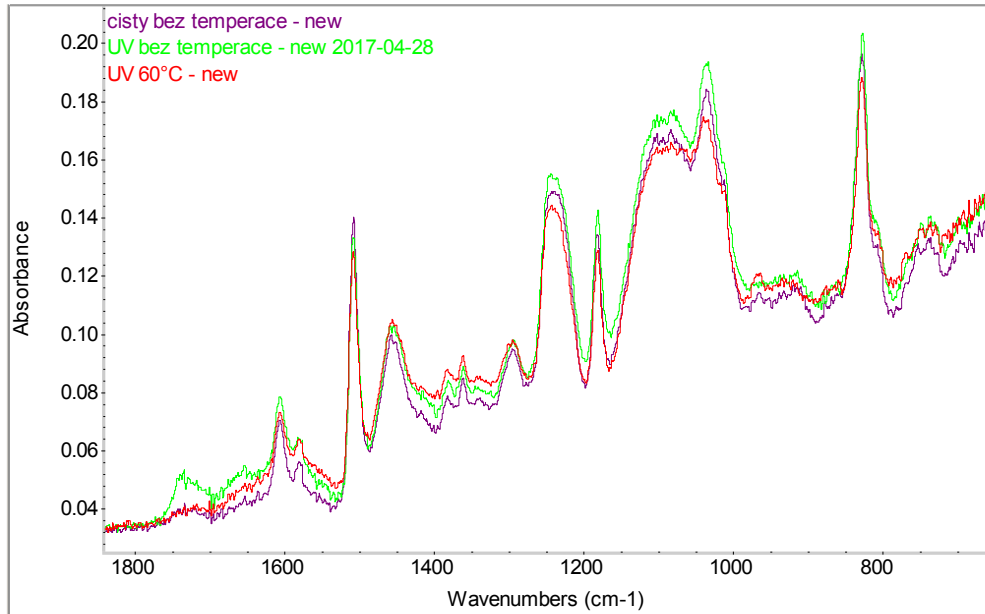


Obr (57) Graf FTIR- vyhodnocení změn při různé temperaturaci



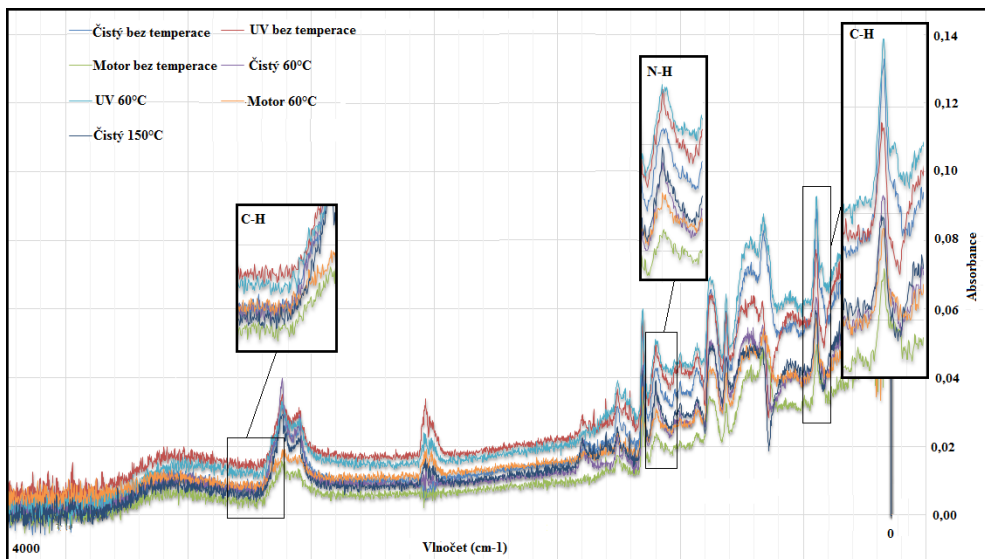
Obr (58) Graf FTIR- detail vyhodnocení změn při různé temperaturaci a expozici

Z dalšího porovnávání (Obr. 57) vzorků vystavených expozici UV při různé temperaturaci lze vidět velkou podobnost píků naznačující jejich stejný stupeň dotvrzení bez změn naznačujících možnou degradaci.



Obr (59) Graf FTIR- detail vyhodnocení změn při různé temperaturaci

Porovnáním měření všech vzorků se opět potvrdil stupeň vytvrzení jednotlivých epoxidových pryskyřic v závislosti od teploty dotvrzení, bez zjevných vlivů expozice.



Obr (60) Graf FTIR- vyhodnocení všech vzorků

9.4 Výsledky zkoušky ohybem

Metoda tříbodového ohybu podle normy ČSN EN ISO 14125. Pro vyhodnocení touto metodou bylo uskutečněno 7 měření pro každou sérii vzorků dotvrzených při různé teplotě.

Měření	Tloušťka h [mm]	Šířka b [mm]	Síla F [N]	Prodloužení ε [%]	Napětí v ohybu σ [Mpa]	Modul pružnosti E [Mpa]
Vzorek 1	3	24,10	74,93	3,03	41,46	14332
Vzorek 2	3	24,00	66,88	3,20	37,16	13042
Vzorek 3	3	24,10	65,26	2,91	36,11	13519
Vzorek 4	3	24,10	87,12	3,65	48,20	16506
Vzorek 5	3	24,00	79,43	4,03	44,13	13833
Vzorek 6	3	24,00	59,31	2,40	32,95	14275
Vzorek 7	3	24,00	71,56	3,58	39,76	14333
Průměr	3	24,04	72,07	3,26	39,96	14263
Směrodatná odchylka				0,54	5,15	1101

Tab (11) Tabulka naměřených a vypočtených hodnot pro kompozit bez temperace

Měření	Dráha s [mm]	Průhyb s' [mm]	Průhyb s'' [mm]	Síla F' při s' [N]	Síla F'' při s'' [N]	ΔS [mm]	ΔF [N]
Vzorek 1	3,03	0,18	0,89	31,28	14,01	0,71	17,27
Vzorek 2	3,20	0,18	0,89	29,29	13,64	0,71	15,65
Vzorek 3	2,91	0,18	0,89	30,61	14,32	0,71	16,29
Vzorek 4	3,65	0,18	0,89	35,12	15,25	0,71	19,89
Vzorek 5	4,03	0,18	0,89	31,48	14,88	0,71	16,6
Vzorek 6	2,40	0,18	0,89	31,60	14,47	0,71	17,13
Vzorek 7	3,58	0,18	0,89	31,34	14,14	0,71	17,2
Průměr	3,26	0,18	0,89	31,53	14,39	0,71	17,1471

Tab (12) Tabulka podle ČSN EN ISO 14125 pro kompozit bez temperace

Měření	Tloušťka h [mm]	Šířka b [mm]	Síla F [N]	Prodloužení ε [%]	Napětí v ohybu σ [Mpa]	Modul pružnosti E [Mpa]
Vzorek 1	3	24,10	72,71	6,50	40,23	8539
Vzorek 2	3	24,10	63,99	4,36	35,40	9876
Vzorek 3	3	24,00	62,35	4,55	34,64	8742
Vzorek 4	3	24,00	59,31	4,14	32,95	8983
Vzorek 5	3	24,30	106,57	7,61	58,47	11877
Vzorek 6	3	24,10	68,71	4,39	38,01	11029
Vzorek 7	3	24,20	89,24	5,54	49,17	11876
Průměr	3	24,11	74,70	5,30	41,27	10132
Směrodatná odchylka				1,32	9,29	1457

Tab (13) Tabulka naměřených a vypočtených hodnot pro kompozit temperovaný při

60 °C

Měření	Dráha s [mm]	Průhyb s' [mm]	Průhyb s'' [mm]	Síla F' při s' [N]	Síla F'' při s'' [N]	ΔS [mm]	ΔF [N]
Vzorek 1	6,50	0,18	0,89	23,12	12,83	0,71	10,29
Vzorek 2	4,36	0,18	0,89	24,88	12,98	0,71	11,9
Vzorek 3	4,55	0,18	0,89	23,71	13,22	0,71	10,49
Vzorek 4	4,14	0,18	0,89	23,70	12,92	0,71	10,78
Vzorek 5	7,61	0,18	0,89	27,90	13,47	0,71	14,43
Vzorek 6	4,39	0,18	0,89	26,31	13,29	0,71	13,29
Vzorek 7	5,54	0,18	0,89	28,11	13,74	0,71	14,37
Průměr	5,30	0,18	0,89	25,39	13,21	0,71	12,2214

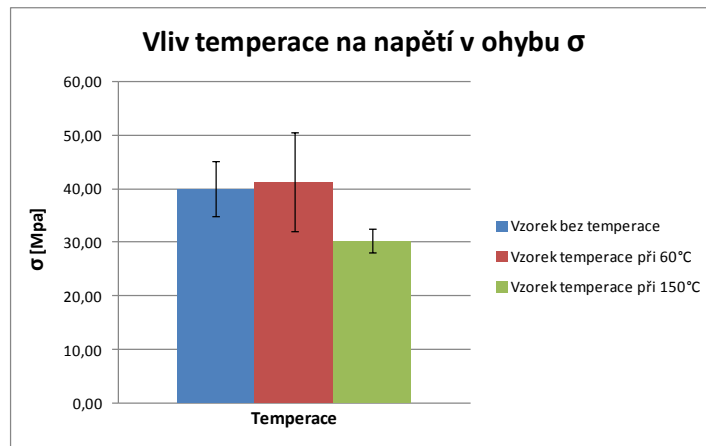
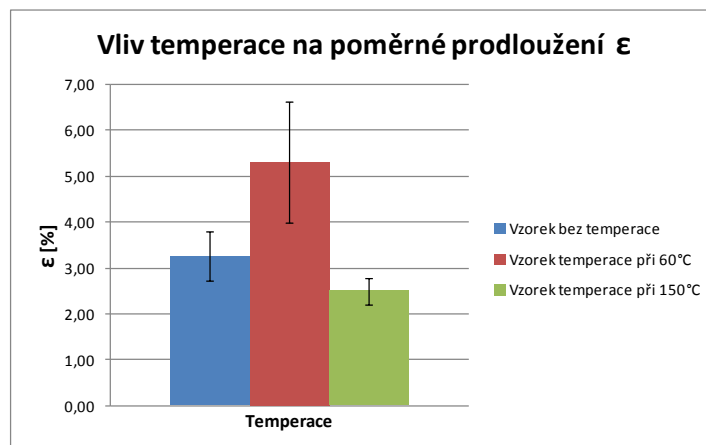
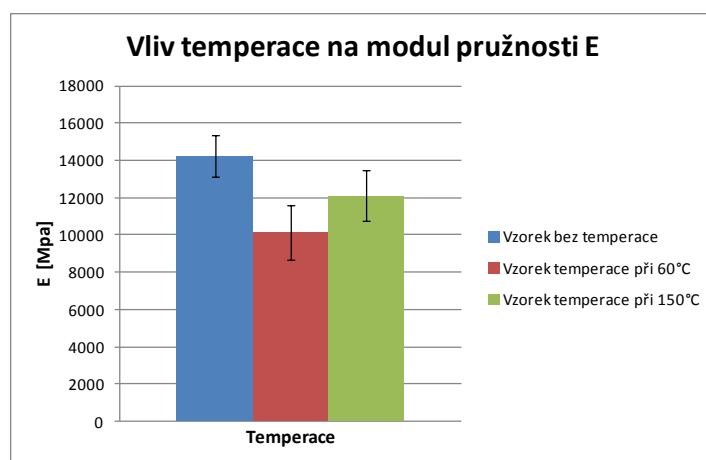
Tab (14) Tabulka podle ČSN EN ISO 14125 pro kompozit temperovaný při 60 °C

Měření	Tloušťka h [mm]	Šířka b [mm]	Síla F [N]	Prodloužení ϵ [%]	Napětí v ohybu σ [Mpa]	Modul pružnosti E [Mpa]
Vzorek 1	3	24,10	50,18	2,99	27,76	9129
Vzorek 2	3	24,00	57,34	2,42	31,86	13075
Vzorek 3	3	24,00	53,37	2,53	29,65	11942
Vzorek 4	3	24,10	57,31	2,41	31,71	12498
Vzorek 5	3	24,10	57,26	2,41	31,68	13087
Vzorek 6	3	24,00	48,45	2,06	26,92	12250
Vzorek 7	3	24,10	58,61	2,65	32,43	12788
Průměr	3	24,06	54,65	2,50	30,29	12110
Směrodatná odchylka				0,28	2,20	1380

Tab (15) Tabulka naměřených a vypočtených hodnot pro kompozit temperovaný při 150 °C

Měření	Dráha s [mm]	Průhyb s' [mm]	Průhyb s'' [mm]	Síla F' při s' [N]	Síla F'' při s'' [N]	ΔS [mm]	ΔF [N]
Vzorek 1	2,99	0,18	0,89	23,62	12,62	0,71	11
Vzorek 2	2,42	0,18	0,89	29,29	13,60	0,71	15,69
Vzorek 3	2,53	0,18	0,89	27,74	13,41	0,71	14,33
Vzorek 4	2,41	0,18	0,89	29,07	14,01	0,71	15,06
Vzorek 5	2,41	0,18	0,89	29,46	13,69	0,71	15,77
Vzorek 6	2,06	0,18	0,89	28,82	14,12	0,71	14,7
Vzorek 7	2,65	0,18	0,89	28,09	12,68	0,71	15,41
Průměr	2,50	0,18	0,89	28,01	13,45	0,71	14,5657

Tab (16) Tabulka podle ČSN EN ISO 14125 pro kompozit temperovaný při 150 °C

Obr (61) Graf ohybu- srovnání hodnoty dosaženého napětí v ohybu σ Obr (62) Graf ohybu- srovnání hodnoty poměrného prodloužení ϵ 

Obr (63) Graf ohybu- srovnání hodnoty modulu pružnosti E

Z výše uvedených a vyhodnocených výsledků (Tab. 11 až 16) byli určeny hodnoty charakterizující mechanické vlastnosti epoxidových matric vyztužených vlákny v závislosti na jejich dotvrzení. Z výsledků pro určení dosaženého maximálního napětí při ohybu můžeme říci, že série bez temperace a s temperací při 60 °C dosahuje srovnatelných hodnot 39,96 a 41,27 MPa co jsou vyšší dosažené hodnoty než u série s temperací při 150 °C (30,29 MPa).

Vliv temperace na poměrné prodloužení vyhodnocuje jako sérii s největším prodloužením při mechanickém namáhání vzorky temperované při 60°C (5,30%).

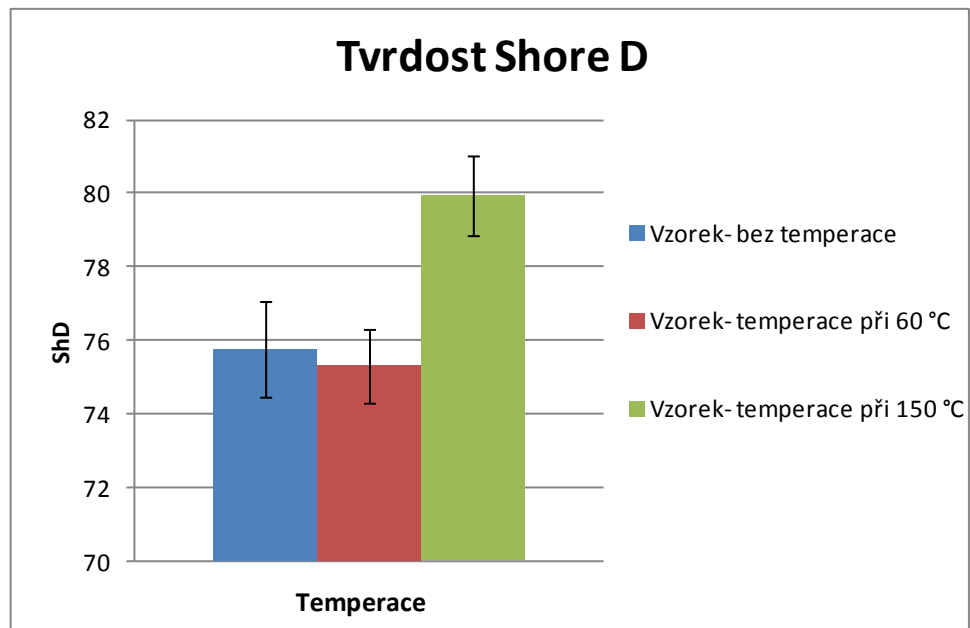
Srovnáním hodnot z hlediska deformace nám popisuje graf modulu pružnosti, kde jako série s nejlepšími elastickými vlastnostmi byli vyhodnocené vzorky bez temperace s hodnotou 14 263 MPa, dále vzorky s temperací při 150 °C s hodnotou 12 110 MPa a nejnižší hodnotu 10 132 MPa měl vzorek temperovaný při 60 °C.

9.5 Výsledky zkoušky tvrdosti

Bylo vykonáno 5 měření na 3 testovaných vzorcích epoxidu dotvrzených při různých teplotách.

Měření	Bez temperace	Temperace při 60 °C	Temperace při 150 °C
1.	77,6	74,1	80,1
2.	75,3	74,9	79,6
3.	74,6	75,3	81,7
4.	74,8	75,4	79,5
5.	76,5	76,9	78,8
Průměr	75,76	75,32	79,94
Směrodatná odchylka	1,3	1,0	1,1

Tab (17) Hodnoty vzorků naměřené podle Shore D



Obr (64) Graf ShD- hodnocení tvrdosti podle zkouškou Shore D

Z naměřených hodnot vyplývá, že vzorky epoxidové pryskyřice dotvrzené bez temperace a při 60 °C mají porovnatelné hodnoty tvrdosti povrchu 75,76 a 75,32 ShD. Vzorek temperovaný při vyšší teplotě vykazuje vyšší tvrdost 79,5 hodnoty ShD. Výsledek opět potvrzuje nedostatečné dotvrzení při teplotě 60 °C.

ZÁVĚR

Cílem diplomové práce bylo identifikovat příčinu zhoršování mechanických vlastností kompozitních dílů s termosetickou matricí na bázi epoxidové pryskyřice, využívaných v leteckém odvětví určených pro kapotážní kryty ultralehkých letounů. Tyto díly v průběhu používání ztrácí svou tuhost a dochází k poklesu jejich viskoelastickému chování, projevující se vyšší deformací. Řešený problém se vyhodnocuje pro společnost zabývající se výrobou těchto dílů, která si nepřeje být v práci uváděna.

Pro analýzu byly připraveny vzorky podle druhu metody zkoušení jak v laminátové podobě při spojení všech složek, tak jenom vzorky čisté pryskyřice. Tyto vzorky byly následně dotvrzeny a vystaveny různým expozicím. Vystavení expozice nemělo v důsledku jen krátké doby jejího trvání (1 měsíc) až na vzorek vystavený expozici v motorovém prostoru žádný patrný vliv na výsledné vlastnosti, proto se práce zaměřovala na určování vlastnosti při různém dotvrzení.

Pozornost byla soustředěna na vyhodnocování stavu vytvrzování v závislosti na postupu požívaném při výrobě daného dílu a při námi zvolených hodnotách. Pro podrobnou analýzu vytvrzení se použila metoda DSC, ze které jsme byli schopni určit teplotu skelného přechodu pro každý typ vzorku a následně i stupeň vytvrzení z hodnot zbytkové entalpie při dynamickém měření. Hodnota T_g zadaného vzorku je přibližně stejná jako u vzorku bez dodatečné temperace ($60\text{ }^\circ\text{C}$) a oproti úplně dotvrzenému ($100\text{ }^\circ\text{C}$) je menší až o $40\text{ }^\circ\text{C}$. Rovněž stupeň vytvrzení je nižší, což vede k závěrům, že postup vytvrzování při výrobě dílů není vyhovující. Pro potvrzení výsledků z DSC byly vzorky podrobeny DMA, která z hodnot pro T_g rovněž potvrdila nedostatečné dotvrzení a z výsledků vztažených na úplně vytvrzenou pryskyřici stanovila hodnotu vytvrzení našeho vzorku na 83 %. Dalším vyhodnocením této metody bylo určení pevnostních charakteristik z modulu pružnosti, kde nejvyšších hodnot dosáhl vzorek při úplném dotvrzení, což je dáno strukturou vyššího zesíťování. Nicméně výsledné hodnoty elastických modulů byly tak nízké, že jsme je porovnali s hodnotami jiné epoxidové pryskyřice pro obdobné použití a při vyhodnocení jsme zjistili, že pevnostní charakteristiky by měli být neporovnatelně vyšší. Z tohoto zjištění padlo podezření, že se nejedná o epoxidovou pryskyřici a vzorky byly podrobeny metodě spektrálního určení FT-IR, která podezření vyloučila a potvrdila původ pryskyřice na 81 %. Tato metoda byla rovněž použita pro sledování dotvrzení na základě změn ve velikostech a posuvu charakteristických píků. U exponovaných vzorků nebyl pozorován žádný výrazný

pokles ve vlastnostech oproti neexponovaným vzorkům. Pro analýzu mechanických vlastností byla původně plánovaná tahová zkouška, avšak v důsledku problémů vykluzování z čelistí díky příliš hladkému povrchu se nepodařilo vzorky roztrhnout. Proto se použila metoda tříbodového ohybu a zkouška tvrdosti. Z naměřených výsledků ohybové zkoušky, byl nejvyšší modul pružnosti určen u vzorku bez temperace. Hodnoty vzorku dotvrzovaného podle aktuálního postupu firmy, jsou nejnižší, ale naopak při vyhodnocování poměrného prodloužení jsou nejvyšší. To napovídá o neúplně zesíťované struktuře, kde volnost mezi řetězci způsobuje jejich vyšší deformaci.

Výsledné hodnocení této práce má teda dva závěry:

1. Současný postup vytvrzování není dostatečný pro dosažení úplného dotvrzení. Nedostatečné dotvrzení má za následek horší mechanické vlastnosti a při vystavení produktu vlivům vnějšího prostředí je jeho struktura více náchylná k degradaci, při kterém dochází k jejímu oslabení. Společně se zatížením a dalšími možnými vlivy, kterým je letoun vystavován dochází k poklesu jeho pevnosti, tuhosti, pružnosti a narušení struktury.

Navrhovaným řešením je změna postupu vytvrzování. Vzhledem k závislosti stupně vytvrzení na teplotě a času, bude nutné zvýšení vytvrzovací teploty za kratší čas nebo nižší vytvrzovací teplotu při delší době dotvrzení.

2. Výsledné vlastnosti úplně vytvrzené pryskyřice dodané od společnosti se při porovnání s epoxidovou pryskyřicí pro obdobné účely jeví jako velmi nedostačující. Při porovnání vlastností kompozitních materiálů s matricí na bázi epoxidových pryskyřic je námi analyzovaný materiál na nejnižších postech hodnocení, samozřejmě záleží i na druhu a obsahu výztuže, její geometrie a uložení.

Navrhovaným řešením je prověření skladování epoxidu, co může být příčina zhoršení jeho vlastností nebo vyzkoušení a porovnání obdobného epoxidu od jiného dodavatele.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] PLOCEK P., SVITAK P., BALEJ J., *Balony a vzducholodě*, Computers Press, 2013, ISBN 9788026402640
- [2] BALEJ J., SVITAK P., PLOCEK P., *Historie letectví*, Computers Press, 2012, ISBN 9788026400417
- [3] ABUŠINOV A., *Kompozity větrných turbín a letadel*, 2013, [online]. [cit. 2017-01-16], dostupné: <http://www.mmspektrum.com/clanek/za-plasty-v-rijnu-na-k-2013.html>
- [4] JANČÁŘ, J., *Úvod do materiálového inženýrství polymerních kompozitů*, Vysoké učení technické v Brně, 2003, ISBN 802-14-2443-5
- [5] KRATOCHVÍL, B., ŠVORČÍK, V., VOJTĚCH, D., *Úvod do studia materiálů*, 190 s., Vyd. 1. Praha: VŠCHT, 2005, ISBN 80-7080-568-4
- [6] BHATTACHARYA, D., STOYKO, F., *Synthetic Polymer-Polymer Composites*, s. 118–141, Hanser Publishers, 2012, ISBN 1569905258
- [7] KŘENA J., *Technologie výroby leteckých dílů z kompozitu na bázi uhlíkové vlákno a termoplastická hlavice*, 2014, [online]. [cit. 2017-01-28], dostupné: <http://www.csm-kompozity.wz.cz/RTLaplikace.pdf>
- [8] KOŘÍNEK Z., *Kompozity*, [online]. [cit. 2017-02-09], dostupné: <http://kompozity.webnode.cz/>
- [9] LIPTAKOVA T., ALEXY P., GONDÁR E., *Polymérne konštrukčné materiály*, EDIS, 2012, ISBN: 9788055405056
- [10] BENEŠ P., *Kinetika vytvrzování epoxidových pryskyřic*, VUT FT Zlín, 2005, [online]. [cit. 2017-03-05], dostupné: <http://digilib.k.utb.cz/handle/10563/441>
- [11] ETHRENSTEIN, G. W., *Polymerní kompozitní materiály*, 351 s., V ČR 1. vyd. Praha: Scientia, 2009, ISBN 97-880-869-6029-6
- [12] STRONG, A. B., *Fundamentals of Composites Manufacturing - Materials, Methods, and Applications (2nd Edition)*, 18 s., Society of Manufacturing Engineers (SME), 2008, ISBN 0-87263-854-5
- [13] NEZBEDOVÁ, E., POSPÍŠIL, L., *Vývoj v oblasti kompozitu s částicovým plnivem*, Polymer institute Brno, [online]. [cit. 2017-02-22], dostupné: http://www.csm-kompozity.wz.cz/Vyvoj_kompozitu.pdf
- [14] TIKL T., Samozpracování obrázků: 8, 9, 14, 29

- [15] AGARWAL, B. D., BROUTMAN, L., *Vláknové kompozity*, 294 s., 1. Vyd. Praha: SNTL, 1987
- [16] BAREŠ, R. A., *Kompozitní materiály*, Učební texty, Praha SNTL, 1988
- [17] LAŠ, V., *Mechanika kompozitních materiálů*, 1. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita, 2004, 156 s. ISBN 80-704-3273-X.
- [18] PASTIER, D., *Uhlíkové vlákna*, Gymnázium J. A. Raymana, Prešov, [online]. [cit. 2017-02-19], dostupné: <http://www.gjar-po.sk/~pastier8b/vlakna.pdf>
- [19] GRÉGR, J., *Povrchové vlastnosti uhlíkových vláken*, učební text FP TU v Liberci, 2014
- [20] CHAVLA, K. K., *Composite Materials Science and Engineering*, 2nd Edition, Springer, New York, 1998, ISBN 978-1-4419-3124-5
- [21] OBRÁZEK 15, *Struktura borového vlákna*, [online]. [cit. 2017-02-27], dostupné: <https://www.coursehero.com/file/p5bh59u/2-127-for-injection-molding-n-Chopped-strand-mats-508-mm-for-chopped-strand/>
- [22] BALZANI, C., WAGNER, W., *Adhesive Joints in Composite Laminates- A Combined numerical/experimental Estimate of Critical Energy Release Rates*, 2011, vol. 32, pp. 23–38, DOI: 10.1016/j.ijadhadh.2011.29.002
- [23] VRBKA, J., *Mechanika kompozitů*, VUTB, studijní materiál, [online]. [cit. 2017-02-28], dostupné: http://www.vutbr.cz/www_base/priloha.php?dpid=83340
- [24] KENDER Š., *Technologie výroby kompozitov*, TUVK ST, 2016, [online]. [cit. 2017-03-04], dostupné: <https://www.sjf.tuke.sk/transferinovacii/pages/archiv/transfer/33-2016/pdf/188-191.pdf>
- [25] OBRÁZEK, *Technologie výroby kompozitů*, [online]. [cit. 2017-03-07], dostupné: <http://www.nuplex.com/composites/products/browse-products>
- [26] MICHNA, Š., *Kompozitní materiály*, [online]. [cit. 2017-03-10], dostupné: http://www.stefanmichna.com/download/technickematerialy_II/kompozitni_materialy.pdf
- [27] BAUMRUK M., *Kompozitné materiály v leteckém průmyslu v ČR*, ČVUT, 2006, Studijní materiály, [online]. [cit. 2017-03-14], dostupné: http://www.kompozity.info/clanky/-compdb/kompozitove_mat_v_let_prumyslu_CR.pdf
- [28] OSTEN, M., *Lepení plastických hmot 2.*, 150 s., opr. vyd. Praha: SNTL, 1974

[29] FAULSTICH M. J., MAYER S., *Evaluation of mechanical properties of four different carbon /epoxy composites used in aeronautical field, centro universitario Salesiano Brazil*, 2003, [online]. [cit. 2017-03-20], dostupné: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1516-14392005000100016

[30] CORITAR D., *Vliv oxidačního stárnutí na fyzikálně-chemické a mechanické vlastnosti polymerních materiálů*, VUT FT Zlín, 2010, [online]. [cit. 2017-03-05], dostupné: http://digilib.k.utb.cz/bitstream/handle/10563/13336/coritar_2010_dp.pdf?sequence=1

[31] HAVEL COMPOSITES, *Technické listy*, [online]. [cit. 2017-04-20], dostupné: <http://www.havelcomposites.com/proddocs/TL%20L%20285%20MGS%20a%20tuz%20CZ.pdf>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

LZ 2	Led Zeppelin 2
CO ₂	Oxid uhličitý
NO _x	Oxidy dusíku
PEEK	Polyetereterketon
PEI	Polyeterimid
PPS	Polyfenylsulfid
PEEK	Polyeterketonketon
EP	Epoxidová pryskyřice
UV	Ultraviolet (ultrafialové záření)
DSC	Diferenční skenovací kalorimetrie
SV _{DSC}	Stupeň vytvrzení určený DSC
ΔH_t	Uvolněné teplo v čase t
$\Delta H_{\text{celk.}}$	Celkové uvolněné teplo
% hm	Hmotnostní procenta
L/D	Poměr délky a průměrů
α	Stupeň konverze
ΔH_{ISO}	Celkové uvolněné teplo izotermního měření
ΔH_{res}	Zbytková entalpie dynamického měření
ΔH_{DYN}	Celkové uvolněné teplo dynamického měření
da/dt	Rychlost reakce konverze v závislosti na jeho stupni a čase
E_{norm}	Normálový modul
E_{vzorku}	Modul vzorku
$E_{100\%}$	Modul při úplném dotvrzení
CaCO ₃	Vápenec

$Al_4[Si_4O_{10}](OH)_8$	Kaolin
$CaMg(CO_3)_2$	Dolomit
$B(OH)_3$	Kyselina boritá
CaF_2	Kazivec
SiO_2	Oxid křemičitý
MgO	Oxid hořečnatý
Al_2O_3	Oxid hlinitý
PAN	Polyakrylonitril
HNO_3	Kyselina dusičná
$NaClO$	Chloran sodný
HM	High Modulus (vysoký modul)
IM	Intermediate Modulus (střední modul)
UHM	Ultra/Very High Modulus (velmi vysoký modul)
AS	Average Strenght (standartní pevnost)
HT	Hight Tenacity (vysoká pevnost)
UHS	Ultra/Very High Strength (velmi vysoká pevnost)
CVD	Chemical vapou deposition (chemické nanášení pár)
BCl_3	Chlorid boritý
H_2SO_4	Kyselina sírová
HCL	Kyselina chlorovodíková
GLARE	Sklo-hliník/epoxid kompozit
PUR	Polyuretan
C-H	Vazba uhlík-vodík
C-O	Vazba uhlík-kyslík
C-N-C	Vazba uhlík-dusík-uhlík
C-C	Vazba uhlík-uhlík

C-O-C	Vazba uhlík-kyslík-uhlík
N-H	Vazba dusík-vodík
ppm	Počet částic na milión
O ₃	Ozón
TFE	Tetraflouretylen
tg δ	Ztrátový uhel
λ	Vlnová délka
DMA	Dynamická mechanická analýza
TGA	Termická gravimetrická analýza
FTIR	Infračervená spektroskopie s Fourierovou transformací
IR	Infračervená spektroskopie
NIR	Blízká infračervená spektroskopie
ATR	Zeslabená úplná reflektance

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. (1) Návrh létajících strojů Leonarda da Vinci [1]	13
Obr. (2) Teplovzdušný balón bratrů Montgolfierových [1].....	14
Obr. (3) Konstrukce vzducholodě LZ 2 [1]	15
Obr. (4) Konstrukce letounu Flyer I [2].....	15
Obr. (5) Progresivní růst procentuálního využití kompozitů v konstrukcích dopravních letadel. [3].....	16
Obr. (6) Synergický efekt kompozitního materiálu [4]	17
Obr. (7) Mechanismus reakce vzniku epoxidových pryskyřic [10]	22
Obr. (7) Mechanismus další reakce epoxidové skupiny s fenolickým hydroxyem [10]	23
Obr. (9) Znázornění sférické a nesférické orientace částic v matrici [14].....	29
Obr. (10) Znázornění orientace krátkých vláken v matrici. [14].....	29
Obr. (11) Rozdělení geometrie dlouhých vláken [14]	30
Obr. (12) struktura skleněného vlákna [11]	31
Obr. (13) Struktura uhlíkového vlákna [11]	33
Obr. (14) Rozdělení uhlíkových vláken. HT – standardně pevné, IM – středně modulová, HM – vysoko modulová, UHM – ultravysokomodulová [11]	34
Obr. (15) Struktura aramidového vlákna [11]	35
Obr. (16) Struktura borového vlákna [21]	35
Obr. (17) Druhy textilií: a) roving, b) rohož, c) tkanina z pramenců, d) tkanina z vláken [11].....	37
Obr. (18) Struktura složení laminátu, hybridu a sendviče [14]	39
Obr. (19) Ruční kladení do negativní formy [24].....	40
Obr. (20) Princip funkce hlavy automatického kladení [24]	41
Obr. (21) Schéma výrobního procesu rotačním navíjením [26]	42
Obr. (22) Schéma výrobního procesu pultruze [26]	42
Obr. (23) Uhlíková konstrukce stíhacího letoun F-117 [26]	43
Obr. (24) Zastoupení kompozitních materiálů v konstrukci Boingu 787 [27]	44
Obr. (25) Kompozitní struktura letounu Bristell NG-5 [27].....	44
Obr. (26) Zobrazení účinku degradace na epoxid/uhlík kompozit [29]	45
Obr. (27) Fáze poškozování kompozitního materiálu [30].....	50
Obr. (28) Schéma rozdělení hledisek hodnocení životnosti leteckých konstrukcí [14]	50

Obr (29) Skelná tkanina AEROGLOSS, vazba kepr 2/2.....	56
Obr (30) Aramid-uhlíková tkanina HYBRID, vazba plátno.....	57
Obr (31) Připravená forma pro ruční laminaci	57
Obr (32) Kladení vrstvy skelné tkaniny.....	60
Obr (33) Kladení vrstvy tkaniny aramid-uhlík a pěnového jádra.....	60
Obr (34) Kladení druhé vrstvy tkaniny aramid-uhlík a uhlíkového pásu	61
Obr (35) Utěsnění a odsátí vzduchu z formy.....	61
Obr (36) Zařízení Mettler Toledo DSC 1	64
Obr (37) Zařízení DX 04T DMA.....	65
Obr (38) Spektrometr Nicolet 6700	67
Obr (39) Zkouška ohybem na zařízení GALDABINI QUASAR 25.....	69
Obr (40) Zkouška tvrdosti na zařízení BAREISS BS61-II.....	70
Obr (41) Graf DSC- izotermního měření celkového tepla reakce ΔH_{ISO} (40°C-90 minut)	71
Obr (42) Graf DSC- dynamického měření residuálního tepla (25°C – 250°C) izotermního skenu	72
Obr (43) Graf DSC- dynamického měření (25°C – 250°C)	72
Obr (44) Graf DSC- dynamický sken pro určení teploty skelného přechodu v závislosti na teplotě vytvrzení	73
Obr. (45) Dynamické skeny zbytkové entalpie pro různé dotvrzení	74
Obr. (46) Závislost teploty skelného přechodu na temperaturaci	75
Obr. (47) Závislost stupně vytvrzení na temperaturaci.....	75
Obr. (48) Závislost teploty skelného přechodu na stupni vytvrzení.....	76
Obr (49) Graf DMA- srovnání teplot skelného přechodu různě vytvrzených epoxidových matic s vlákny.....	77
Obr (50) Graf DMA- srovnání modulů pro různě vytvrzené epoxidové matrice s vlákny.....	78
Obr (51) Graf DMA- srovnání modulů testovaných vzorků a epoxidu pro obdobné použití.....	78
Obr (52) Graf FTIR- vyhodnocení shody testovacích vzorků.....	79
Obr (53) Graf FTIR- porovnání shody testovacích vzorků	80
Obr (54) Graf FTIR- vyhodnocení epoxidové směsi.....	81
Obr (55) Graf FTIR- vyhodnocení diaminového tvrdidla	81

Obr (56) Graf FTIR- vyhodnocení jednotlivých složek a epoxidové směsi.....	82
Obr (57) Graf FTIR- vyhodnocení změn při různé teplotě.....	83
Obr (58) Graf FTIR- detail vyhodnocení změn při různé teplotě a expozici.....	83
Obr (59) Graf FTIR- detail vyhodnocení změn při různé teplotě.....	84
Obr (60) Graf FTIR- vyhodnocení všech vzorků.....	84
Obr (61) Graf ohybu- srovnání hodnoty dosaženého napětí v ohybu σ	87
Obr (62) Graf ohybu- srovnání hodnoty poměrného prodloužení ϵ	87
Obr (63) Graf ohybu- srovnání hodnoty modulu pružnosti E.....	87
Obr (64) Graf ShD- hodnocení tvrdosti podle zkouškou Shore D.....	89

SEZNAM TABULEK

Tab. (1) Porovnání termoplastických matric pro letecké aplikace [17].....	19
Tab. (2) Základní mechanické vlastnosti jednotlivých druhů vláken [17]	36
Tab (3) Specifika epoxidové pryskyřice L 285 [31].....	54
Tab (4) Hodnoty zpracování dle teploty a typu tvrdidla [31]	55
Tab (5) Specifikace tvrdidel typu 285, 286 a 287 [31].....	55
Tab (6) Mechanické vlastnosti nevyztužené pryskyřice [31]	56
Tab (7) Specifikace zkušebních těles podle normy ČSN EN ISO 527-1	68
Tab (8) Reakční tepla čisté pryskyřice pro izotermní a dynamické měření	73
Tab (9) Tabulka hodnot určení stupně vytvrzení v závislosti na T_g a ΔH_{RES}	74
Tab (10) Tabulka porovnání hodnot teploty skelného přechodu a modulu	77
Tab (11) Tabulka naměřených a vypočtených hodnot pro kompozit bez temperace	85
Tab (12) Tabulka podle ČSN EN ISO 14125 pro kompozit bez temperace.....	85
Tab (13) Tabulka naměřených a vypočtených hodnot pro kompozit temperovaný při 60 °C.....	85
Tab (14) Tabulka podle ČSN EN ISO 14125 pro kompozit temperovaný při 60 °C.....	86
Tab (15) Tabulka naměřených a vypočtených hodnot pro kompozit temperovaný při 150 °C.....	86
Tab (16) Tabulka podle ČSN EN ISO 14125 pro kompozit temperovaný při 150 °C.....	86
Tab (17) Hodnoty vzorků naměřené podle Shore D.....	88

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1: Výsledky a grafy pro vyhodnocení pomocí DSC

Příloha 2: Výsledky a grafy pro vyhodnocení pomocí DMA

Příloha 3: Výsledky a grafy pro vyhodnocení pomocí FTIR

Příloha 4: Výsledky a grafy pro vyhodnocení pomocí ohybové zkoušky

Příloha 5: Technické listy