

VÝZKUM MATRIC PRO PREPREG APLIKACE

Bc. Ota Sigmund

Diplomová práce
2017



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

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

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: Bc. Ota Sigmund
Osobní číslo: T15708
Studijní program: N3909 Procesní inženýrství
Studijní obor: Výrobní inženýrství
Forma studia: kombinovaná

Téma práce: Výzkum matic pro pre-preg aplikace

Zásady pro vypracování:

1. Literární rešerše v oblasti kompozitních materiálů, základní rozdělení a vzájemné srovnání.
2. Pre-preg, popis, vlastnosti, výroba a technologické možnosti zpracování.
3. Požadavky na matrice pre-pregových systémů.
4. Volba vhodných matic pro pre-pregy.
5. Testování pre-preg kompozitních materiálů dle doporučení vedoucího práce.
6. Vyhodnocení dosažených výsledků.
7. Závěr diplomové práce.

Rozsah diplomové práce:

Rozsah příloh:

Forma zpracování diplomové práce: tištěná/elektronická

Seznam odborné literatury:

Dle doporučení vedoucího práce.

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

Datum zadání diplomové práce: 2. ledna 2017

Termín odevzdání diplomové práce: 12. května 2017

Ve Zlíně dne 23. ledna 2017



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



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

Příjmení a jméno: Bc. Ota Sigmund

Obor: Výrobní inženýrství

P R O H L Á Š E N Í

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

Ve Zlíně



⁽¹⁾ 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 odborných prací.

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

(3) Disertační, diplomové, bakalářské a rigorózní práce odevzdané uchazečem k obhajobě musí být též nejméně pět pracovních dnů před konáním obhajoby zveřejněny k ochlizení 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 výtisk, opisy nebo rozmnožování.

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

⁽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, § 35 odst. 3.

(3) Do práva autorského náleží (nahrady) škola nebo školství či vzdělávací zařízení), ať je-li škola za účelem přímého nebo nepřímého hospodářského nebo obchodního prospěchu i výuky nebo k vlastní potřebě dílo vytvořené dílnem nebo studenty ke splnění školních nebo studijních povinností vyplývajících z jeho právního vztahu ke škole nebo školství či vzdělávacímu zařízení (školní dílo).

¹¹ 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 školství či vzdělávací zařízení mají za obvyklých podmínek právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla (§ 13 odst. 1). Odpověď-li autor takového díla udělí svolení bez výhradního důvodu, mohou se tyto osoby domáhat nahrazení chybnějšího projevu jeho vůle u soudu. Ústanovení § 15 odst. 3 zůstává neplatným.

(2) Nemá-li sjednáno jinak, má-li autor školního díla své dílo užití či poskytnout jinému škola, není-li to v rozporu s oprávněnými zájmy školy nebo školství či vzdělávacího zařízení.

(3) Škola nebo školství či vzdělávací zařízení jsou oprávněny požadovat, aby jim autor školního díla s výjimkou jím dosaženého v souvislosti s užitím díla či poskytnutím licence podle odstavce 2 přiměřené příjmy na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložil, a to podle okolností až do jejich skutečné výše, přičemž se přiměřeně liší výši výdělku dosaženého školou nebo školství či vzdělávacím zařízením z užití školního díla podle odstavce 1.

ABSTRAKT

Diplomové práce se zabývá testováním vlastností matric vhodných pro výrobu prepreg systémů pro vysoce výkonné kompozitní díly. V teoretické části práce jsou popsány kompozitní materiály, vlastnosti matric a vláken, výroba a rozdělení prepreg systémů a technologie zpracování kompozitů z prepregů. Praktická část práce je zaměřena na výrobu a testování matric určených pro prepreg systémy. Porovnává různé druhy matric a skelných vláken v několika vrstvách. Cílem práce je vyhodnocení testovaných kompozitních systémů vhodných pro prepreg aplikace.

Klíčová slova: kompozitní materiály, vlákna, matrice, prepregy, mechanické vlastnosti

ABSTRACT

The diploma thesis deals with testing the properties of matrices suitable for the manufacture of prepreg systems for high performance composite parts. The theoretical part describes composite materials, properties of matrices and fibers, production and distribution of prepreg systems and processing technology of prepregs. The practical part is focused on the production and testing of matrices for prepreg systems. It compares different types of matrix and glass fibers in several layers. The aim of this work is to evaluate tested computerized systems suitable for prepreg applications.

Keywords: composite materials, fibers, matrix, prepreg, mechanical properties

Poděkování

Chtěl bych tímto poděkovat vedoucí práce Doc. Ing. Soně Rusnákové, Ph.D za poskytnuté rady a připomínky, které mi pomohly při řešení diplomové práce. Děkuji Ing. Milanu Žaludkovi, Ph.D za pomoc při mechanických zkouškách kompozitních materiálů. Na závěr děkuji mé rodině, nejbližším přátelům a spolužákům, kteří mě podporovali ve studiu.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci vypracoval samostatně a že všechny použité literární zdroje jsem správně a plně citoval. Diplomová práce je z hlediska obsahu majetkem Fakulty technologické UTB ve Zlíně a může být využita ke komerčním účelům se souhlasem vedoucího diplomové práce a děkana FT UTB. Prohlašuji, že odevzdaná verze diplomové práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou totožné.

.....

podpis studenta

OBSAH

I	TEORETICKÁ ČÁST	11
1	KOMPOZITY	12
1.1	ZÁKLADNÍ ROZDĚLENÍ KOMPOZITŮ	13
1.2	HISTORIE A POUŽITÍ MIKROKOMPOZITŮ	15
1.3	NEJMODERNĚJŠÍ APLIKACE KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ	16
2	VÝZTUŽ A MATRICE	19
2.1	VYZTUŽUJÍCÍ VLÁKNA PRO KOMPOZITY	20
2.1.1	Tkaniny	21
2.1.2	Skleněná vlákna	23
2.1.3	Aramidová vlákna	24
2.1.4	Uhlíková vlákna	25
2.2	POLYMERNÍ MATRICE	28
2.2.1	Reaktivní pryskyřice	29
2.2.2	Termoplasty.....	31
2.2.3	Podmínky spojení vlákna a matrice	31
2.2.4	Vytvrzení epoxidové matrice	32
3	PREPREGY	33
3.1	VLASTNOSTI, ROZDĚLENÍ A POSTUPY VÝROBY PREPREGŮ	34
3.2	ZÁKLADNÍ FÁZE VÝROBY PREPREGŮ	37
3.2.1	Rozpouštědlový způsob výroby prepregu	41
3.2.2	Výroba prepregu pomocí metody horké taveniny	43
3.2.3	Chemický B-stav výroby prepregu	45
3.3	PODNIKY PŮSOBÍCÍ V OBLASTI VÝROBY PREPREGŮ	47
4	TECHNOLOGIE VÝROBY KOMPOZITŮ Z PREPREGŮ	48
4.1	RUČNÍ KLADENÍ.....	49
4.2	STROJNÍ KLADENÍ PREPREGŮ – ATL.....	49
4.3	NAVÍJENÍ PRAMENOVÉHO PREPREGU - AFP.....	49
5	ZKOUŠKY MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ	50
5.1	STATICKÁ TAHOVÁ ZKOUŠKA.....	51
II	PRAKTICKÁ ČÁST	53
6	CÍLE DIPLOMOVÉ PRÁCE	54
7	MATERIÁLY A ZAŘÍZENÍ PRO ZKUŠEBNÍ VZORKY	55
7.1	VÝZTUŽ – TKANINA AEROGLOSS 200	55
7.2	POLYMERNÍ MATRICE ARALDITE LY 1556.....	56
7.2.1	Araldite® LY 1556	57
7.2.2	Aradur® 1571	57
7.2.3	Accelerator 1573	58
7.2.4	Hardener XB 3471	58
7.3	POLYMERNÍ MATRICE EPOREZIT EPOVILL A/T-111.....	59
7.3.1	EPOREZIT EPOVILL-A	60
7.3.2	EPOREZIT T-111	60

7.4	SEPARÁTORY FOREM	61
7.5	STROJE A ZAŘÍZENÍ.....	62
7.5.1	Vyhřívaný lis MITAS	62
7.5.2	Zkušební zařízení ZWICK 1456	63
8	VÝROBA ZKUŠEBNÍCH VZORKŮ	65
8.1	NÁVRH VÝROBY ZKUŠEBNÍCH VZORKŮ	66
8.1.1	Výpočet množství potřebné pryskyřice vzhledem v vrstvám kompozitu.....	68
8.2	VÝROBA ZKUŠEBNÍCH VZORKŮ	70
8.2.1	Výztuž	70
8.2.2	Matrice	71
8.2.3	Příprava formy	73
8.2.4	Vrstvení prepregů do formy	74
8.2.5	Vytvrzení.....	76
8.2.6	Úprava vzorků kompozitu pro tahovou zkoušku	78
8.3	VADY A ZMETKY PŘI VÝROBĚ.....	79
9	ZKOUŠKY VZORKŮ	81
9.1	TAHOVÁ ZKOUŠKA	81
9.1.1	Nastavení zkušebního zařízení	81
9.1.2	Zkušební vzorky.....	83
9.2	STATISTICKÁ NEJISTOTA MĚŘENÍ.....	83
9.3	NAMĚŘENÉ HODNOTY PŘI TAHOVÉ ZKOUŠCE	84
10	HODNOCENÍ VÝSLEDKŮ ZKOUŠEK.....	86
10.1	VYHODNOCENÍ TAHOVÉ ZKOUŠKY	86
10.1.1	Kompozitní materiál - 2 vrstvy skelné výztuže.....	86
10.1.2	Kompozitní materiál - 4 vrstvy skelné výztuže.....	90
10.1.3	Kompozitní materiál - 6 vrstvy skelné výztuže.....	94
10.1.4	Mechanické vlastnosti vzorků podle počtu vrstev	98
	ZÁVĚR	99
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	101
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	103
	SEZNAM OBRÁZKŮ	105
	SEZNAM TABULEK.....	108
	SEZNAM PŘÍLOH.....	110

ÚVOD

V dnešní moderní době si život bez polymerních a kompozitních materiálů nedovedeme představit, setkáváme se s nimi téměř ve všech odvětvích průmyslu od stavebnictví, medicíny, elektrotechniku, stavebnictví, sportu, kosmetice až po potřeby běžného života. Mezi jedny z prvních nejznámějších kompozitních materiálů patří železobeton, kompozit z ocelových drátů a betonu, skelný laminát, kompozit ze skleněných vláken a pryskyřice nebo například asfaltová směs na výrobu povrchu komunikací. Největší rozmach v posledních desetiletích však zažívají polymerní kompozitní materiály a žádná jiná skupina těchto materiálů nemůže nabídnout tak široké možnosti využití jako vlákny vyztužené polymery. V konkurenci s klasickými materiály, zejména kovy, se polymery prosadily zejména svojí snadnou spracovatelností, nízkou měrnou hmotností a obecně výhodným poměrem užitných vlastností a cenou. Tyto materiály splňují požadavky od jednoduchých technických aplikací až po extrémní konstrukce v letectví a kosmonautice.

S rostoucími požadavky na kvalitu a vlastnosti výrobků se jejich výroba neustále zdokonaluje a výrobci se snaží téměř libovolně upravovat, kombinovat a měnit složení kompozitů a najít ten nejvhodnější materiál přesně dle potřeb a požadavků zákazníků. Jejich výsledné vlastnosti pak předčí dosud používané jednosložkové materiály nebo slitiny. Přestože jsou kompozitní polymerní materiály dnes velmi používané jsou veškeré výrobní postupy a vlivy jednotlivých složek a materiálů teprve ve fázi vývoje a výzkumu. Neustále se hledají, upravují a testují ty nejvhodnější materiály jednotlivých složek.

Ve světě kompozitů se již delší dobu používají přednasyčené tkaniny všeobecně známé pod názvem prepreg. Kompozitní materiály vyrobené z prepregů vykazují vynikající vlastnosti, jsou vysoce pevné, teplotně odolné, tuhé a extrémně lehké. Jednou z velkých předností prepreg technologie je také jednodušší výrobní proces.

Cílem diplomové práce je posouzení vlastností reaktoplastických matric vhodných pro prepreg systémy, porovnává různé vrstvy skelné vyztuže a různé výrobní postupy v závislosti na teplotě a času vytvrzení. V závěru proběhne vyhodnocení testovaných prepreg systémů a jejich vzájemné srovnání. [1, 2]

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 KOMPOZITY

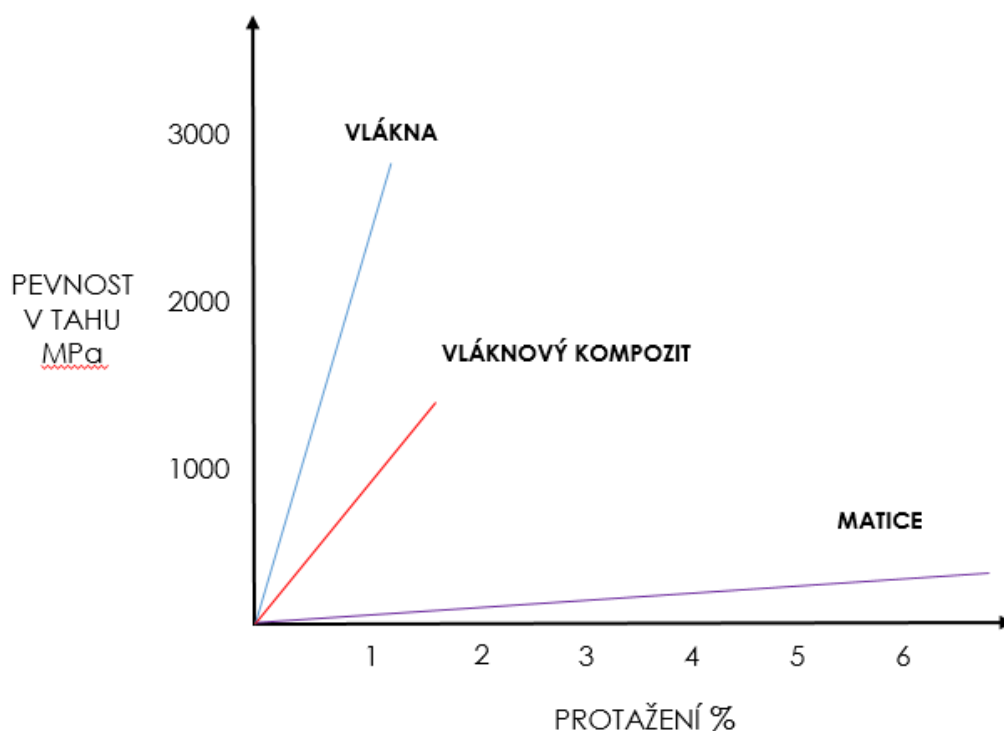
Kompozitní materiály neboli zkráceně kompozity jsou materiály složené ze dvou nebo více složek s odlišným chemickým a fyzikálním složením. Obvykle jedna složka dává výrobku pevnost a druhá slouží jako pojivo. Vzájemným spojením dávají výslednému výrobku nové naprosto specifické vlastnosti, které nemá žádná z jeho složek. Vlastnosti kompozitních materiálů jsou ovlivněny mírou smíchání obou fází, které dohromady dávají výslednému produktu specifické vlastnosti. Tento charakteristický jev se nazývá tzv. *synergismus*, což znamená, že vlastnosti kompozitu jsou vyšší, než by odpovídalo pouhému poměrnému sečtení vlastností jeho jednotlivých složek. Existence synergismu je velmi významná, neboť vede k získávání materiálů kvalitativně zcela nových vlastností. Kompozity jsou tedy složené materiály, které se liší od slitin tím, že jednotlivé složky si ponechávají své charakteristiky, ale jsou tak vloženy do materiálového systému, že se uplatní pouze jejich přednosti a potlačí jejich nedostatky.

Hlavní předností kompozitu je především jejich hmotnost, oproti tradičním ocelovým součástem mají i při větším objemu stále podstatně nižší hmotnost, což usnadňuje jejich přepravu a rychlou a snadnou montáž. Kompozitní materiály se výrazněji nedeformují (jejich mez elasticity odpovídá mezi pevností). Mají velmi vysokou mez únavy a jsou stabilní a spolehlivé. Kompozity mají výbornou ohnivzdornost v porovnání s lehkými slitinami, nicméně výpary mohou být toxické. Nevýhodou kompozitních materiálů s epoxidovou maticí může být citlivost na ředidla. Jiné běžné chemikálie užívané ve strojích jako oleje, plastická maziva, rozpouštědla, barvy či ropa kompozity nepoškozují. Kompozity stárnou v závislosti na vlhkosti a teplotě. Kromě vynikajících mechanických a pevnostních charakteristik mají absolutní odolnost proti korozi i v agresivním prostředí, včetně UV záření a výborné tepelně izolační vlastnosti. Kompozitní materiály jsou stálobarevné a laminátové konstrukce jsou prověřeny dlouhodobým provozem. Variabilita tvarů a barev bez omezení umožňuje dokonalé přizpůsobení specifiku dané stavební struktury. Nežádoucí může být nasákavost kompozitů.

Složený kompozitní materiál musí splňovat následující podmínky pro definici kompozitu. Musí mít odlišné mechanické, fyzikální a chemické vlastnosti výztuže a matrice, musí mít více než 5% podíl výztuže a kompozit musí být připraven smícháním složek. [1, 3]

1.1 Základní rozdělení kompozitů

Kompozitní materiály můžeme rozdělit podle několika hledisek. Podle základní spojité fáze tedy použitého materiálu matrice rozeznáváme kovové kompozity (např. slitiny vyztužené vlákny, částicemi, cermety), polymerní kompozity (s termoplastovou, reaktoplastovou nebo elastomerní matricí), keramické kompozity a ostatní anorganické kompozity. Jiné rozdělení kompozitních materiálů je na základě struktury nebo geometrické charakteristiky dispergované (vložené) fáze složek do matrice. Podle výztuže rozeznáváme kompozity na vláknové a částicové. Na obr. 1 je znázorněn graf výsledných vlastností jednosměrného kompozitu a na obr. 2 je zobrazena základní klasifikace kompozitů.

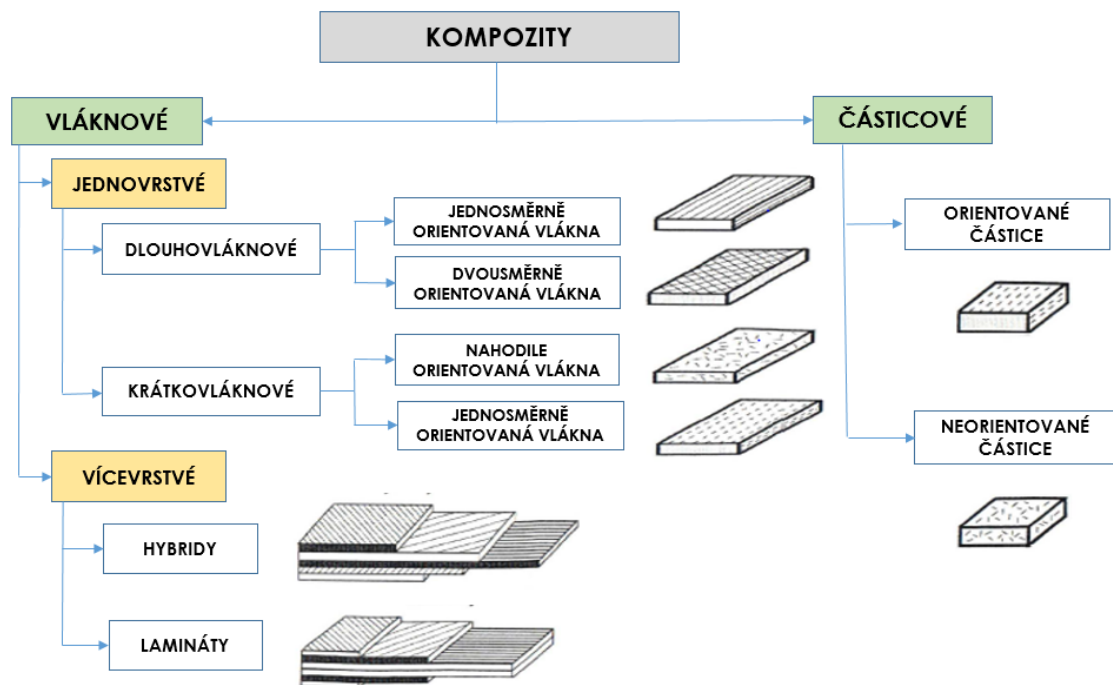


Obr. 1 Graf výsledných vlastností jednosměrného kompozitu - diagram vlastností kompozitu ve směru vláken

Vláknové kompozity jsou vyztuženy vlákny, které mají délkové rozměry podstatně větší než průřezové a můžeme je dále dělit na jednovrstvé a vícevrstvé. Vícevrstvý kompozitní materiál se nazývá také laminát (z latinského slova *lamina* což znamená vrstva). U vláknových kompozitů je hlavním problémem vložení vláken do matrice tak, aby se mechanicky nepoškodila. Musí být zachováno přesné usměrnění a rovnoměrné

rozdělení vláken ve výrobku a zajištěna soudržnost vláken a matrice. Vlákná se mohou relativně snadno mechanicky poškodit při manipulaci a to i prostým dotykem dvou vláken nebo třením, poškrábáním, dotykem náradí apod. Proto byla vyvinuta řada výrobních způsobů tzv. prostorového uspořádání vláken a míšení s matricí, aby se zamezilo poškození vláken a zůstala zachována geometrie uložení. Jedna z nich je výroba polotovarů přednasyčené tkaniny – prepregu.

Za částicové kompozity lze považovat všechny materiály, jejichž struktura je tvořená matricí zpevněnou jemnými částicemi (obvykle o rozměrech menších než $1\ \mu\text{m}$). Jemné částice mohou být kovy, kysličníky kovů nebo konstrukční keramika. Mezi nejvýznamnější částicové kompozity na bázi plastů patří pryže. Základní surovinou je kaučuk. Plněním sazí nebo SiO_2 (40 - 50% hmotnostních dílů) se dosahuje až 10-ti násobného zvýšení pevnosti. Např. SBR (styren butadien kaučuk) plněný 50% hmotnostními díly sazí dosahuje pevnosti 26 MPa s modulem pružnosti $E = 4,6\ \text{MPa}$ a tažnosti 520 %. Plněním plastů jemnými částicemi minerálů, keramiky nebo kovů vede většinou ke zvýšení jejich tuhosti, modulu pružnosti a někdy i pevnosti.



Obr. 2 Základní rozdělení kompozitních materiálů [4]

Kompozitní materiály mohou obsahovat vyztužující vlákna různých rozměrů, z tohoto hlediska je rozdělujeme na: makrokompozity, mikrokompozity a nanokompozity.

Makrokompozitní materiály obsahují výztuž o velikosti příčného rozměru až 102 mm. Jejich využití je především ve stavebnictví, kde se používá zejména železobeton což je beton zpevněný ocelovými lany nebo pruty nebo polymerbeton což je beton s drceným kamenivem a pryskyřicí.

V průmyslu jsou nejvíce používané a mají největší význam mikrokompozitní materiály. Jejich příčné rozměry výztuže, vláken a částic jsou v rozmezí 10^0 až 10^2 μm . Mikrokompozitní materiály mají menší hustotu než kovy a slitiny a tím mají lepší poměr pevnosti v tahu a modulu pružnosti k hustotě a tím dosahují velké měrné pevnosti.

Nanokompozitní materiály jsou charakteristické rozměrem výztuže, délkou částice nebo průměrem vlákna, pouze v jednotkách nm. V současné době převažuje jejich použití při čištění vody u filtrů, v potravinářském průmyslu, při výrobě textilních látek se speciálními vlastnostmi, při získávání a uchovávání elektrické energie a uplatňují se také v biomedicině a farmacii. V tkáňovém inženýrství jsou dnes používána jako podklad pro pěstování lidských buněk. [4, 5, 6, 7]

1.2 Historie a použití mikrokompozitů

Nejvíce průmyslově využívanou skupinou kompozitů jsou mikrokompozitní materiály, u kterých má velké uplatnění výroba polotovarů tzv. prepregů. Velký rozmach tohoto odvětví nastal začátkem dvacátého století s postupnou výrobou nových vláken a pryskyřic. Níže je uveden pouze stručný výťah z historie vzniku mikrokompozitních materiálů se zaměřením na výrobu vláken a polotovarů prepregů: [8]

- 1933 – začátek výroby skleněných vláken v USA,
- 1940 – počátek výroby keramických vláken,
- 1943 – sklolaminátová konstrukce trupu vojenského letounu SPITFIRE,
- 1957 – první uhlíkové vlákno z viskózy v USA,
- 1959 – borová vlákna (chemická depozice par na vláknový substrát CVD),
- 1960 – první polymerní vlákno meta-aramid Nomex v USA,
- 1961 – první uhlíkové vlákno z polyakrylonitrilu (PAN) v Japonsku,

- 1966 – začátek výroby lisovaného prepregu ze skleněných vláken (SMC technologie s UP – polyesterová pryskyřice) např. spojler automobilu Chrysler Estate,
- 1990 – výroba prepregu z uhlíkových vláken (prepreg Torayca),
- 1993 – proteinová vlákna pavouků z mléka transgenetických koz,
- 1997 – chemicky temperované sklo s odolností proto poškrábání (Gorilla) vyrobené ze skleněných vláken, zasklení elektroniky s dotykovými obrazovkami,
- 2000 - piezoelektrická keramická vlákna (PZT vlákna, USA),
- 2003 – počátek komerční výroby prepregů s kovovou (Ti) maticí a keramickými (SiC) vlákny,
- 2006 – první vlákno z uhlíkových nanotrubiček v USA,
- 2014 – výroba prepregu z přírodního rostlinného vlákna (Ambercomposites vyrábí prepreg Multipreg 8020 se lněnými vlákny, tkaninový prepreg je dostupný s plátnovou nebo keprovou vazbou),
- 2014 – nové vysokopevnostní uhlíkové vlákno společnost Toray (Japonsko),
- 2015 – objevení Q carbonu.

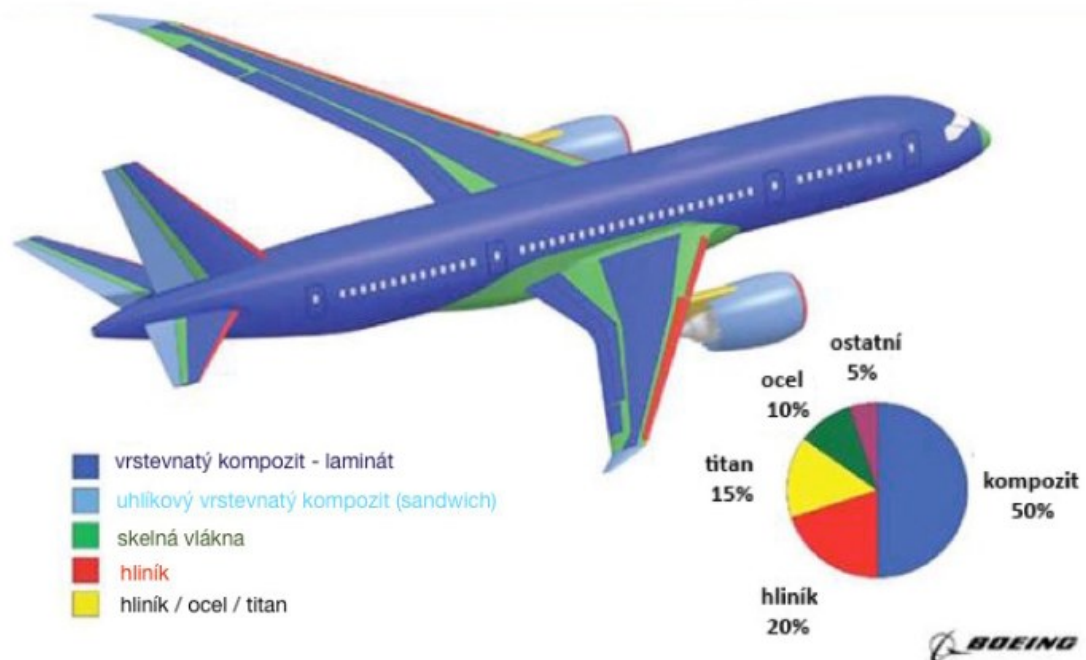
1.3 Nejmodernější aplikace kompozitních materiálů

Hlavním odvětvím, které uvádí jakýsi trend, rozvoj nebo rozšíření nových kompozitních materiálů je vojenský, letecký a kosmický průmysl. Níže jsou stručně uvedeny výrobky vyrobené prepreg technologií po roce 2000: [8]

- Bezposádkový člun Piranha vyrobený z uhlíkových tkaninových prepregů zpevněných uhlíkovými nanotrubičkami (výrobce Zyvex Technologies).
- Stíhací letoun s technologií stealth JSF F-22 Raptor vyrobený z uhlíkových vláken a nanotrubiček a bismaleimidové a epoxidové pryskyřice (výrobce Lockheed Martin Aeronautics).
- Dopravní letadlo Boeing 787 Dreamliner, letadlo pro 210 až 330 pasažérů je z 50 % (hmotnostních) kompozitní, na obr. 3 je znázorněn podíl jednotlivých materiálových složek letadla.
- Osobní automobil SEREEBO japonské společnosti Teijin vyrobený z uhlíkových vláken vyztužených termoplasty, díly jsou z jednosměrných a izotropních

kompozitů vyráběny vstřikováním plastů z LFRT (Long Fiber Reinforced Plastics). Připravuje se výstavba nového výrobního závodu v USA.

- Dopravní letadlo Airbus A350 XWB, jeden z největších výrobců dopravních letadel Airbus Industrie vyrábí letadlo pro 350 pasažerů, které je z 52 % (hmotnostních) kompozitní. Prepregy pro potah trupu se středně modulovými pevnými uhlíkovými vlákny v houževnaté epoxidové pryskyřici. Na ochranu proti úderu blesku jsou použita uhlíková vlákna tkaná s měděnými drátky. Komerční lety od roku 2015.



Obr. 3 Podíl jednotlivých materiálů při výrobě letadla Boeing 787 [9]

- Raketoplán Dream Chaser je vícenásobně použitelný pilotovaný raketoplán vyvíjený v USA firmou Sierra Nevada Corporation. Koncipovaný jako vztlakové těleso s horizontálním přistáním a vertikálním startem na klasické raketě. Kompozitové díly jsou vyrobeny z bismaleimidové pryskyřice M65 od Hexcel, konstrukce je sendvičová s nekovovými voštinami, tepelný štít je vyroben z keramických destiček. První let s posádkou v roce 2018, výrobce Lockheed Martin Aeronautics. Na obr. 4 je ilustrační obrázek raketoplánu.

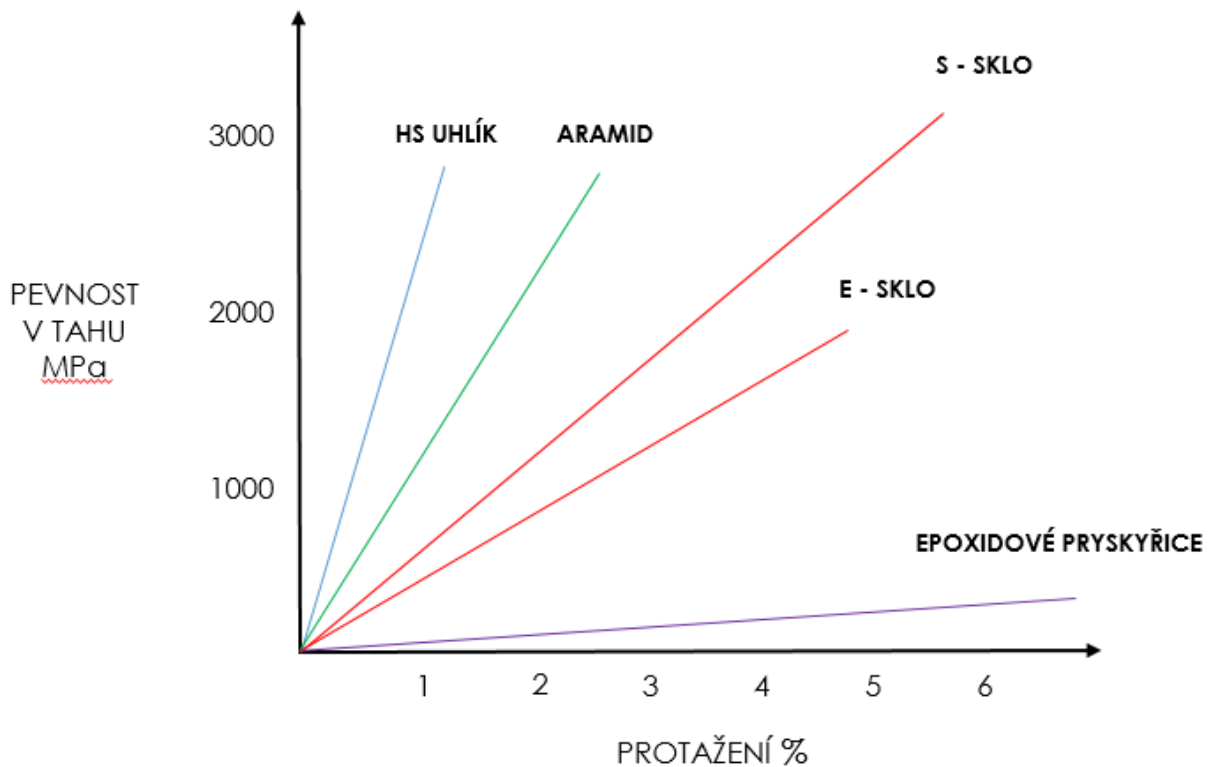
- Dopravní prostředek Orion CST-100 vyrábí NASA a ESA za použití nejmodernějších kompozitních technologií. První let plánovaný na rok 2017.
- Český letoun UL-39 Albi představený v roce 2016, jedná se o první český letoun vyrobený z uhlíkových prepregů autoklávovou technologií. Prototyp sportovního ultralehkého letounu vycházející z koncepce legendárního proudového letounu L-39 Albatros. Jedná se o unikátní český projekt pod záštitou Fakulty strojní ČVUT v Praze. Jako první skloubili dmyhadlový pohon s drakem letounu vyrobeným současnými špičkovými kompozitovými technologiemi. Konstrukce draku letounu je především z důvodu úspory hmotnosti celokompozitová z uhlíkových prepregů. Kompozity byly rovněž použity z důvodu úspory hmotnosti i tam, kde to není zcela standardní, jsou z nich například i podvozkové nohy, nebo náhon dmýchadla. [10]



Obr. 4 Raketoplán nové generace Dream Chaser [11]

2 VÝZTUŽ A MATRICE

Kompozity se skládají ze dvou odlišných charakteristických složek označovaných jako výztuž a matrice. Výztuž tvoří nespojitou složku kompozitu je tvrdší, tužší a pevnější a jejím hlavním úkolem je konečný kompozit vyztužit a tím mu dodat potřebné mechanické vlastnosti zejména pevnost a tuhost. Matrice je plastická a poddanější složka polymeru a zastává funkci pojiva výztuže. Na obr. 5 je zobrazena pevnost v tahu nejčastěji používaných vláken s epoxidovou matricí. Obecně matrice je materiál pro „ukládání“ vyztužujících vláken nejčastěji plast (reaktoplast, termoplast) nebo kov např. hliník, uhlík, keramika. Úkolem matrice je zaručení geometrického tvaru, zavedení a přenos sil a ochrana vláken. Na výztuže se používají textilní materiály, zejména skleněná, uhlíková a aramidová vlákna. [2]



Obr. 5 Graf vlastností vybraných složek kompozitu

2.1 Vyztužující vlákna pro kompozity

Materiály ve formě vláken nemají téměř žádné využití jako konstrukční prvky, teprve ve spojené formě jako kompozitní materiál nachází široké uplatnění. V kompozitním materiálu vytváří podmínky vyztužujícího účinku, to představuje především zvýšení pevnosti a tuhosti, které vzniká uložením výztuže do základního materiálu (matrice), musí být splněny následující podmínky:

- vyztužující vlákna musí být pevnější jak matrice,
- vyztužující materiál musí mít vyšší tuhost než matrice,
- matrice se nesmí porušit dříve než vlákno.

Na výztuže se používají textilní materiály, zejména skleněná, aramidová a vlákna uhlíková. Vlastnosti vláken můžeme porovnat z deformačního chování zejména jednosměrných vyztužených laminátů, při stejném obsahu vláken a tahovým namáháním ve směru vláken. Nejvyšší hodnoty pevnosti a tuhosti vykazují vlákna uhlíková. V tab. 1 je porovnání mechanických vlastností a hustoty nejvíce používaných vláken.

Tab. 1 Porovnání mechanických vlastností a hustoty vybraných vláken [1]

Vlastnosti vybraných skleněných vláken			
Druh vlákna	Hustota g/cm ³	Mez pevnosti v tahu MPa	E modul pružnosti MPa
skleněná typ E	2,60	3 400	73 000
skleněná typ S	2,53	4 400	86 000
skleněná typ C	2,52	2 400	70 000
aramidová	1,45	3 400 - 3 800	80 000 - 186 000
uhlíková	1,6 - 2	1 500 - 3 500	180 000 - 500 000

Většina vyztužujících vláken se, ze zpracovatelských důvodů, upravuje na samostatné výrobní produkty. Jedná se použití pro textilní zpracování, vyztužování reaktoplastů a termoplastů, lehčených plastů nebo výrobu povrchových rohoží a papíru.

Vyztužující vlákna se dodávají ve formě: [1]

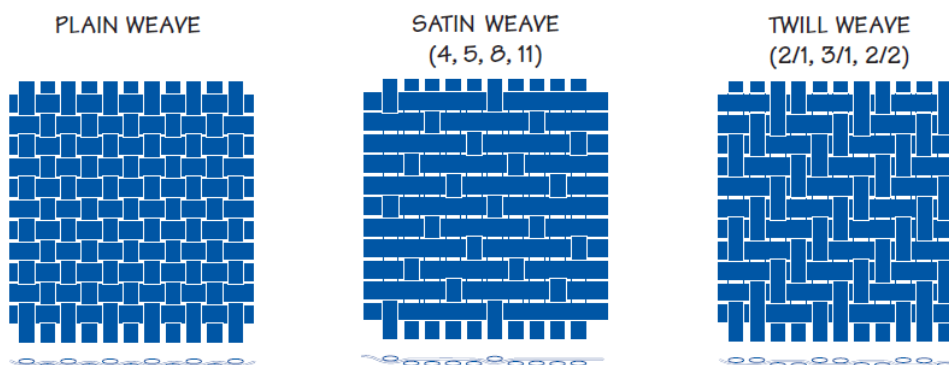
- příze,
- skané příze (nitě),
- pramence (rovingu),
- spředeného rovingu,
- rohože ze sekaného pramence,
- rohože z kontinuálních vláken,
- povrchové rohože,
- krátkého vlákna,
- tkaniny,
- jednosměrné pásy,
- úplety,
- trojrozměrné tkaniny,
- pleteniny.

2.1.1 Tkaniny

Tkaniny jsou plošné výrobky z vláken nebo pramenců uložených pravoúhle v útku a osnově, které působí výztužně ve dvou směrech. Vlákná v osnově mohou mít rozdílné typy křížení vláken, říkáme jim vazby. Druhy nejvíce používaných vazeb jsou znázorněny na obr. 6. V obou směrech lze měnit hmotnost vláken až v poměru 1 : 20. Tkaniny jsou lépe zpracovatelné než jednosměrně orientované výztuže. [1]

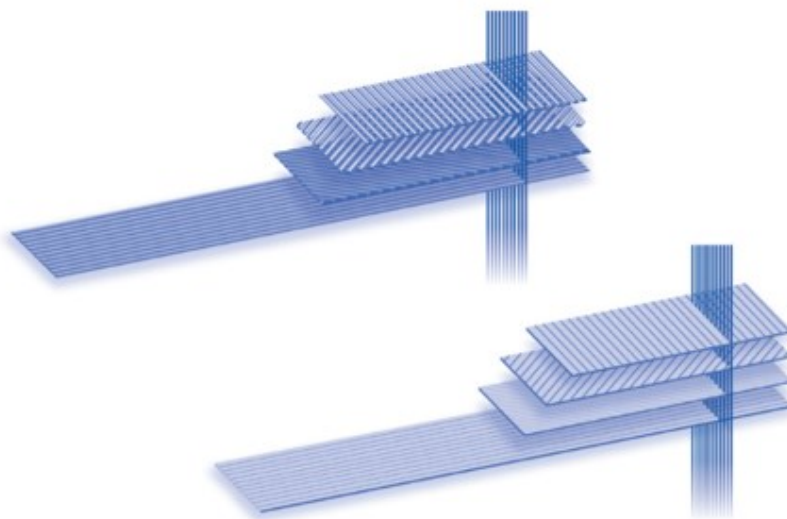
Druhy tkaninových vazeb:

- Plátňová vazba – základní jednoduchá vazba, jednoduché zpracování, rozměrová stálost, malé otřepy při řezání.
- Atlasová (saténová) vazba – velmi malé vychýlení vláken, dobře řasitelná a vhodná pro tvarové prvky, dosahuje velmi hladký povrch.
- Keprová vazba – větší pevnost a tuhost, ohebnější tkanina vhodná pro tvarové prvky.



Obr. 6 Druhy tkaninových vazeb: Plain Weave – plátňová vazba, Satin Weave – saténová vazba, Twill Weave – keprová vazba [12]

Jednosměrně orientované výztuže ve formě rovingu se zpracovávají vrstvením minimálně dvou vrstev a následným prošitím, nazýváme je multiaxiální tkaniny. Na obr. 7 jsou znázorněny způsoby uložení jednosměrných tkanin a jejich prošití.



Obr. 7 Způsoby uložení jednosměrných multiaxiálních tkanin a jejich prošití [12]

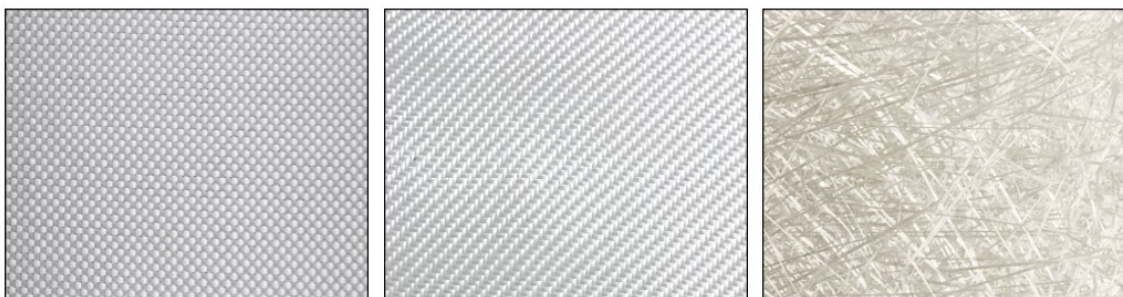
Tkaniny s různou skladbou vláken: [1, 12]

- Jednosměrná tkanina – tenká vlákna v útku fixují silná plátna v osnově, aplikace s vysokou pevností a tuhostí při jednosměrném namáhání (např. výroba lyží).
- Směsná tkanina – různé druhy tkanin v osnově a útku, např. kombinace uhlíkových (vysoká tuhost) a skleněných vláken (výhodná cena).
- Hybridní tkanina – využití odlišných kladných vlastností jednotlivých vláken, např. aramidová vlákna (rázová houževnatost), uhlíková vlákna (tuhost), skleněná vlákna (pevnost v tlaku).
- Multiaxiální tkaniny – různě uložené vrstvy jednosměrných vláken, produktivní výroba a velmi dobré mechanické vlastnosti kompozitu. Tyto tkaniny se dělí podle vrstvení na:
 - biaxiální (bidiagonální) tkaniny ($\pm 45^\circ$),
 - triaxiální tkaniny ($0^\circ/\pm 45^\circ$),
 - quadriaxiální ($0^\circ/-45^\circ/90^\circ/+45^\circ$).

2.1.2 Skleněná vlákna

Textilní skleněná vlákna jsou tenká vlákna s pravidelným kruhovým průřezem o průměru 3,5 až 24 μm , tažená z roztavené skloviny a používaná pro textilní zpracování, pro vyztužování reaktoplastů, termoplastů a lehčených plastů, pro výrobu povrchových rohoží a papíru. Vysoká relativní hodnota pevnosti je důsledkem silné kovalentní vazby mezi křemíkem a kyslíkem v trojrozměrné síti skloviny. Na rozdíl od uhlíkových a aramidových vláken jsou skleněná vlákna, na základě své amorfní struktury, izotropní. To znamená, že jsou jeho materiálové vlastnosti stejné v podélném a příčném směru. Textilní skleněná vlákna se dodávají ve formě příze, skané příze (nitě), pramence (rovingu), spředeného rovingu, rohože ze sekaného pramence, rohože z kontinuálních vláken, povrchové rohože, tkaniny a krátkého vlákna. Konečné vlastnosti kompozitního materiálu jsou ve značné míře závislé na druhu, obsahu a orientaci skleněných vláken. [1]

Skelné tkaniny jsou nejčastěji používaný výztužný materiál, jsou odolné proti ohni a mnoha chemikáliím. Nejčastěji používané vazebné vzory jsou na obr. 8. Nevýhodou skelných tkanin je nízká odolnost proti trvalému namáhání nebo oděru. Výhodou je zejména jejich cena. [13]



Obr. 8 Skelné tkaniny – plátno, kepr, sekané vlákno [13]

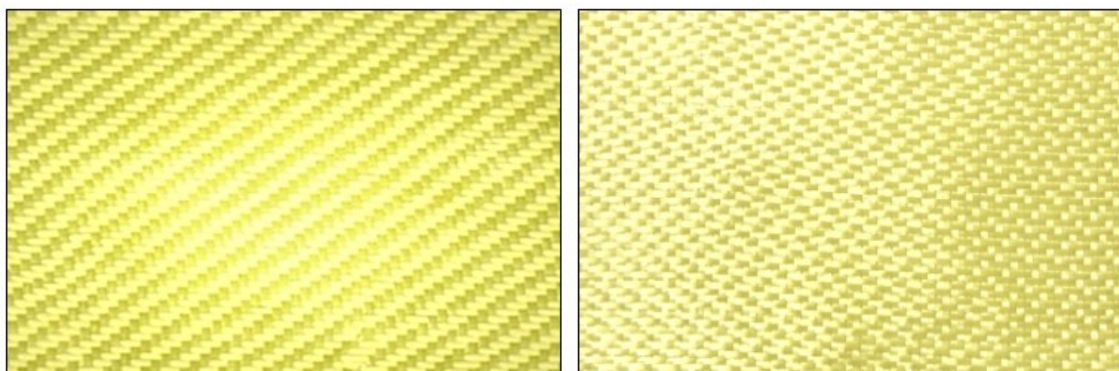
Skleněná vlákna se vyrábějí ve sklářských pecích tažením z trysek. Při teplotě 1400°C se roztaví křemičitý písek, vápenec, kaolín, dolomit, kyselina boritá a kazivec a vznikne E-sklovina, která se dále čiří a následně je přes trysky tažena do navíjecího zařízení. Trysek z platinové slitiny je 200 až 4000 a vytváří velmi tenká vlákna, která jsou následně spřádána. Sdružením téměř neviditelných elementárních vláken vzniká ohebné spřádací vlákno. Pro výrobu skleněných vláken se dnes používá také S-sklovina a D-sklovina (borosilikátové sklo), které mají lepší mechanické a dielektrické vlastnosti, jsou však výrazně dražší než E-sklo.

Modul pružnosti v tahu skleněných vláken je přibližně stejně velký jako u hliníku a tvoří jednu třetinu hodnoty oceli. Pevnost v tahu v kompaktní formě je vyšší než u oceli. Skleněné vlákno nemá viskoelastické chování jako syntetická vlákna a deformace je přitom téměř elastická. Mají výborné tepelné vlastnosti, ani při dlouhodobém trvalém tepelném namáhání při 250°C se nesnižují hodnoty mechanických vlastností. Tepelná vodivost je vyšší než u ostatních materiálů, ale podstatně nižší než u většiny kovů. Skleněná vlákna jsou nehořlavá a ohnivzdorná. Součinitel teplotní délkové roztažnosti je nižší než u většiny konstrukčních materiálů. [1]

2.1.3 Aramidová vlákna

Aramidová vlákna (AF – Aramid Fiber) jsou vlákna na bázi lineárních organických polymerů. Kovalentní vazby aramidových vláken jsou orientovány podle osy vlákna a předností těchto vláken je vysoká pevnost a tuhost. Molekuly jsou navzájem spojeny vazbami vodíkových můstků, aromatická jádra v řetězcích a pravidelné uspořádání fenylenových jader a aramidových skupin zaručují řetězcům vysokou tuhost a současně vysokou hustotu struktury uspořádání.

Aramidová vlákna patří do zvláštní skupiny syntetických vláken, která jsou vzhledem k jejich chemickým vlastnostem obzvláště pevná a odolná vůči vysokým teplotám. Aramid zajišťuje velmi vysokou odolnost proti nárazům, oděru a je mnohem odolnější vůči zlomení. Na obr. 9 jsou nejvíce používané vazebné vzory aramidových tkanin.



Obr. 9 Aramidové tkaniny – kepr, satén [13]

Výroba polyfenylentereftalamidových vysoce krystalických vláken se silně orientovanými molekulami probíhá spřádáním z vysokoviskozního 20% roztoku v koncentrované kyselině sírové. Elementární vlákna se spojují a pro zlepšení zpracovatelnosti se propírají, neutralizují a opatřují aviváží. Aviváž je pomocný textilní prostředek pro zlepšení kluzných a zpracovatelských vlastností.

Aramidová vlákna se mohou zpracovávat se všemi běžnými reaktivními pryskyřicemi a termoplasty. Používají se zejména jako náhrada azbestu v třecích a brzdových obložkách, výztuž pro pneumatiky, balistické aplikace a světlovodné kabely. Kompozity z aramidových vláken jsou zejména vhodné pro lehké konstrukce s převažujícím tahovým namáháním, nikoli však pro konstrukce namáhané ohybem nebo tlakem. Je to nejlehčí vyztužující vlákno s vysokou pevností v tahu ($\rho = 1,45 \text{ g.cm}^{-3}$), ale je silně anizotropní, jeho vlastnosti se výrazně liší ve směru vlákna a v příčném směru. Hodnota modulu pružnosti v tahu nebo hodnoty pevnosti měřené kolmo k vláknu jsou výrazně nižší než hodnoty měřené ve směru vlákna.

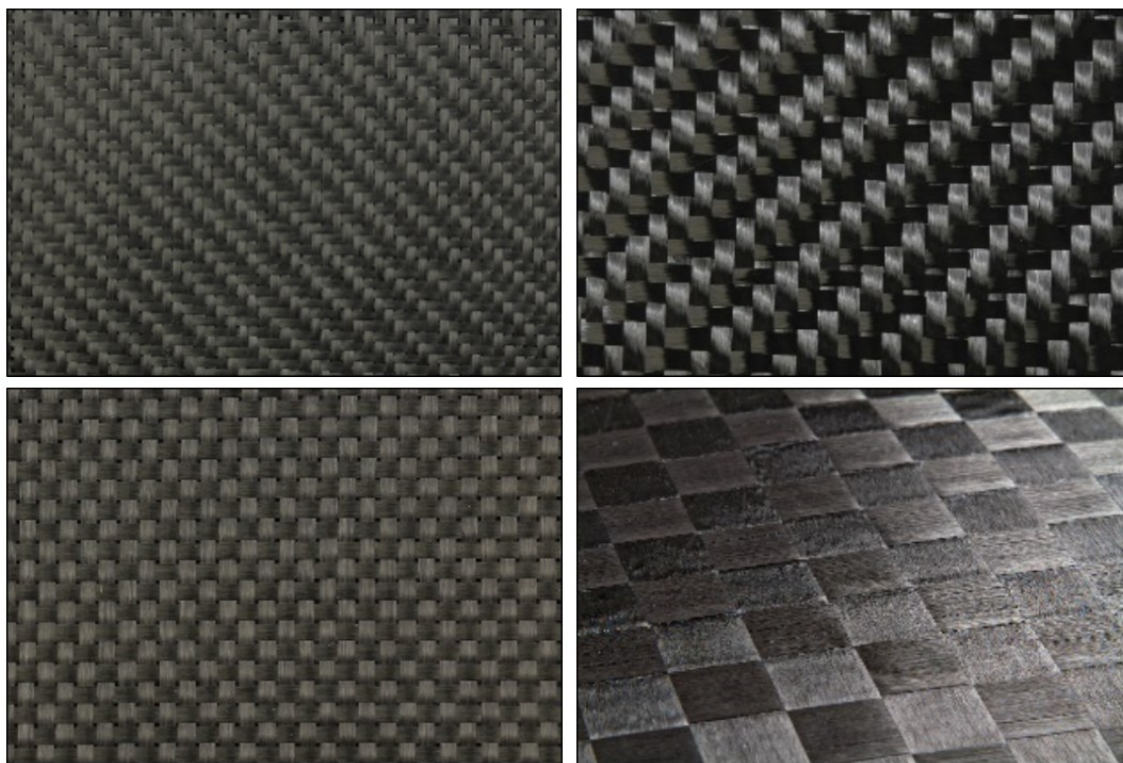
Další specifickou vlastností aramidových vláken, která ovlivňuje pevnost spoje mezi vláknem a matricí, je že vlákna jsou hydrofilní, tzn. absorbují vlhkost až do 7 % svého objemu. K výraznému poklesu pevnosti aramidových vláken dochází také při expozici záření (např. UV záření). Vytvrzené konstrukční výrobky z aramidových nebo kevlarových kompozitů se obtížně obrábějí, ale jsou vysoce odolné proti oděru, průrazu a jako organická vlákna nejsou příliš odolná proti vysokým teplotám. Ve formě kompozitu, ale odolávají teplotám až 300 °C, neroztaví se a používají se například pro protipožární obleky. Výrobky z aramidových vláken se používají nebo jsou přímo vyžadována na výrobu bezpečnostních prvků. [1,13]

2.1.4 Uhlíková vlákna

Uhlíková vlákna (CF – Carbon Fiber) jsou technická vlákna s extrémně vysokou pevností a tuhostí, ale s nízkou tažností. Obvykle se skládají z více než 90 % uhlíku, do 7 % dusíku, 1 % kyslíku a 0,3 % vodíku. Výrobky z uhlíkových vláken se vyznačují vysokou pevností, velmi nízkou hmotností, mají vysokou elektrickou vodivost, nízkou tepelnou vodivost, mají vysokou odolnost vůči vnějším vlivům a mohou v mnoha případech nahradit pevnostní komponenty nebo nosné konstrukce. Díky svému jedinečnému a nadčasovému

vzhledu mají široké využití v technologické špičce v oborech motosportu, aerospace, engineeringu a sportu.

Typy uhlíkových vláken: vysoce pevné (HT) vlákno, vlákno s vysokým modulem pružnosti (HM) a sekaná vlákna s nízkou pevností (LM). Na obr. 10 jsou typy uhlíkových tkanin s vazebními vzory.



Obr. 10 Uhlíkové (karbonové) tkaniny: karbon - kepr, karbon – kepr - široký, karbon - plátno, TeXtreme [13]

Výchozí surovinou pro výrobu uhlíkových vláken je celulóza, polyakrylonitril (PAN) a smola. Suroviny ve vláknitém tvaru jsou nejprve karbonizovány, přitom se oddělí všechny prvky až na uhlík a za působení teploty dochází grafitizací ke zvýšení mechanické pevnosti. Při teplotě nad 1800°C je ukončena tvorba grafitové struktury. Předpokladem pro vysokopevnostní a vysokomodulová vlákna je co nejtěsněji uložená kontinuální síť silných vazeb. Vzhledem k požadavku nízké měrné hmotnosti materiálu se používají k výrobě prvky jako bor, uhlík, dusík, kyslík a křemík.

Pro výrobu uhlíkových vláken se používají hlavně dva výrobní postupy s použitím:

- „Prekurzoru“ polyakrylonitrilu (PAN) – nejprve dlužen a následně zahříván na teplotu 200 až 300°C za přítomnosti vzduchu. Materiál přitom dehydruje a přemění se na žebříčkový polymer. Následuje přeměna polymeru pyrolýzou (karbonizací) v inertní atmosféře při teplotě do 1600°C na grafickou strukturu. Vznikají vysoko-pevnostní vlákna s pevností do 5000 N.mm⁻² a s E-modulem 230000 N.mm⁻².
- Surovin bohatých na uhlík – smola na bázi kamenouhelného dehtu nebo dehtů vznikajících při výrobě ropy. Suroviny se tepelně zpracují při teplotě nad 350°C na přechodový stupeň mezi uspořádanou krystalickou fází a izotropní kapalnou fází, tzv. mezofází. Následuje stabilizace a karbonizace při teplotě až 2000 °C a dochází k přeměně na uhlík. Tímto způsobem se vyrobí vlákna s E-modulem až 700000 N.mm⁻², ale s nižší pevností než u PAN 2000 N.mm⁻².

Mezi pozitivní vlastnosti uhlíkových vláken patří dobrá elektrická a tepelná vodivost, snášenlivost s tělesnými tkáněmi (výroba implantátů – např. umělé kyčelní klouby), dobrý průchod pro záření (neodráží radarový paprsek), odolnost proti dynamickému namáhání a i když jsou velmi hořlavá, je rychlost hoření uhlíkových vláken velmi pomalá. Vlákna z uhlíku jsou za normálních podmínek velmi křehká a při zpracování se lámou, proto se povrchově upravují apretací, směsí na bázi epoxidové pryskyřice, která slouží jako ochrana při zpracování a slouží k zajištění lepšího spojení matrice a vlákna. Při delším skladování ovšem ztrácí vlákna ohebnost. Na obr. 11 je zobrazen automobilový díl vyrobený z uhlíkové tkaniny. [1, 13]



Obr. 11 Automobilový díl vyrobený z uhlíkové (karbonové) tkaniny [14]

2.2 Polymerní matrice

Kompozitní polymery vyztužené vlákny se skládají nejenom z vláken o vysoké měrné pevnosti, ale zejména z úložného materiálu – matrice. Pojem matrice představuje materiál, který je prosycen systémem vláken a partikulárních komponent tak, že po zpracování vznikne tvarově stálý výrobek, který označujeme jako kompozit. Matrice zaručuje zejména geometrický tvar výrobku, zavedení a přenos sil, ochranu vláken a to je:

- přenos namáhání na vlákna,
- zajištění namáhání z vlákna na vlákno,
- udržuje geometrickou polohu vláken a tvarovou stálost výrobku,
- ochrana vlákna před vlivy okolí.

Dnes rozlišujeme zejména dvě skupiny plastů, které tvoří základ matrice polymerní kompozitního materiálu, jsou to termoplasty a reaktoplasty (dříve nazývány také termosety). Termoplasty jsou složeny z jednotlivých makromolekul vázaných pouze fyzikálními vazbami. S rostoucí teplotou postupně měknou a přecházejí do taveniny. Viskózní konzistence taveniny termoplastů umožňuje použití všech běžných zpracovatelských technologií. Naproti tomu makromolekuly reaktoplastů jsou spojeny do husté souvislé sítě a s rostoucí teplotou se nemohou roztavit a většinou ještě zvyšují svoji tuhost a tvrdost. Výhodou termoplastů oproti reaktoplastům je jejich houževnatost a také jejich zpracování, které probíhá pouze roztavením a ztuhnutím matrice. U termoplastů neprobíhá žádný chemický proces, který by ovlivňoval jakost výrobku nebo narušoval životní prostředí.

Nejčastěji používanou skupinou reaktoplastů určených pro výrobu kompozitů jsou reaktivní pryskyřice. Původně se pro kompozity používaly jen vyztužené nenasycené polyesterové pryskyřice (UP-R) nebo epoxidové (EP-R) pryskyřice, které dnes tvoří většinu kompozitních aplikací. Pro náročné aplikace v agresivním prostředí a pro více mechanicky a tepelně namáhané zařízení se dnes používají vinylesterterové pryskyřice (VE-R). V tab. 2 jsou zobrazeny vlastnosti vybraných reaktivních pryskyřic. Výhodou pryskyřic je zejména jejich zpracování při normální teplotě nebo při výrazně nižších teplotách než reaktoplasty a tím jsou energetické nároky na prosycování vláken nízké. Avšak i v případě zpracování reaktivních pryskyřic ve formě taveniny je jejich viskozita nižší než viskozita termoplastů a proto se reaktoplasty snadněji zpracovávají, snadněji smáčejí a lépe prosycují vlákna. Zpracovatelské teploty termoplastů jsou mnohem vyšší a jsou

omezeny teplotou rozkladu a jejich viskozita při zpracování je ve srovnání s reaktoplasty sto až tisícínásobná. Termoplastické pryskyřice se vytvrzují přidavkem katalyzátoru a urychlovače popřípadě dodáním energie v podobě tepla nebo záření. Vytvrzením získá kompozit své konečné vlastnosti.

Tab. 2 Vlastnosti vybraných reaktivních pryskyřic [1, 4]

Vlastnosti reaktivních pryskyřic				
Druh pryskyřice	Hustota g/cm ³	Mez pevnost v tahu MPa	E modul pružnosti GPa	Tažnost %
fenolická	1,4	50 - 60	7	0,5
epoxidová	1,15 - 1,45	50 - 95	2 - 3,5	2 - 7
polyesterová	1,4	40 - 85	2 - 3	1 - 25
bismaleimidová	1,22 - 1,35	45 - 90	2 - 4,5	1,5 - 6

Důležitým faktorem kvality kompozitu je zajištění adheze na fázovém rozhraní matrice s vláknem. Každý určitý druh matrice vyžaduje specifickou apretaci, která se nanese na vlákno a výsledný kompozit má lepší fyzikální a popřípadě chemické vazby mezi vlákny a maticí. Matrice musí mít správnou viskozitu a povrchové napětí pro dokonalé smočení vlákna a pro zamezení vzniku bublin. [1, 2, 4, 15]

2.2.1 Reaktivní pryskyřice

Reaktivní pryskyřice jsou nejčastěji používanou skupinou reaktoplastů určených pro výrobu polymerních kompozitů. Jsou to kapalné nebo tavitelné pryskyřice, které se sami nebo za pomoci jiných složek tvrdidel jako jsou iniciátory, katalyzátory, urychlovače, aldehydy (fenol) apod. vytvrzují polyadici nebo polymerací bez odštěpení těkavých složek.

Reaktivní pryskyřice také nazýváme jako licí, laminační, impregnační, prosycovací nebo zalévací (elektro) pryskyřice.

Mezi nejdůležitější typy reaktivních pryskyřic patří:

- Nenasycené polyesterové pryskyřice (UP-R).
- Vinylesterové (VE-R) nebo fenakrylátové (PFA-R) pryskyřice.
- Epoxidové pryskyřice (EP-R) – dobré mechanické vlastnosti (matrice pro vysokopevnostní uhlíková vlákna), chemická odolnost dle tvrdidla, dobrá adheze, cenově nevýhodné, hůře zpracovatelné, nutný přesný poměr míšení.
- Fenolické pryskyřice – nízký výrobní podíl, zpracování za použití kyselin (rezoly), jsou vysoce tepelně a chemicky odolné (dopravní prostředky).
- Metakrylátové pryskyřice (MA-R).
- Izokyanátové pryskyřice.

Vytvrzením reaktivních pryskyřic vzniká trojrozměrně zesíťovaná hmota. Vytvrzující se smícháním s tvrdidly jako jsou iniciátory a urychlovače nebo aldehydy. Souvisí s tím:

- exotermní reakce (vývoj tepla),
- zvýšení viskozity nebo počáteční pokles viskozity,
- zmenšení objemu (smrštění).

Rozdělení reaktoplastických kompozitů dle obsahu, obsahující:

- Nepravidelně rozdělená krátká vlákna – délka vláken 6-75 mm, polyesterová lisovací hmota vyztužená 6-12 mm dlouhými skleněnými vlákny, určené pro lisování nebo vstřikování.
- Tkaniny nebo rohože prosycené pryskyřicí – lamináty vyztužené tkaninou nebo rohoží, zpracování ruční nebo strojní injekční technologie, jedná se převážně pro malosériovou výrobu velkoplošných dílů např. čluny nebo rotorové lopatky větrných elektráren.

Kontinuální výroba kompozitů představuje především technologii výroby tažením (pultruze) a navíjením. Při této technologii se nekonečně dlouhá vyztužující vlákna nebo rohože kontinuálně prosycují pryskyřicí. Při pultruzi probíhá vytvrzování a konečné tvarování protahováním vyměnitelným profilovým průvlakem. Navíjením na otáčející trn se vyrábějí rotačně symetrická tělesa, jako jsou roury, nádrže nebo tlakové zásobníky. [1]

2.2.2 Termoplasty

Termoplasty mají jiné zpracovatelské a uživatelské vlastnosti než reaktoplasty. Termoplasty jsou na rozdíl od reaktivních pryskyřic za normální teploty pevné látky a teprve po zahřátí na teplotu většinou nad 200°C jsou dostatečně tekuté. Pro termoplasty je použití rozpouštědel pro snížení viskozity problematické, protože i po odstranění rozpouštědla zůstává snížená odolnost proti korozi při napětí. [1]

2.2.3 Podmínky spojení vlákna a matrice

Nejlepších vlastností kompozitů lze dosáhnout jen tehdy, podaří-li se převést všechny působící síly na vlákna. Předpokladem je dosažení dobré adheze - spojení mezi vláknem a matricí. Většina plastů se svým chemickým složením liší od složení vyztužujících vláken, proto je nutné použít látek, které zvyšují pevnost spojení obou složek, odpovídající předúpravou výztuže apreturou. Organosilany, které tvoří apretura, se přidávají do lubrikace, která se nanáší při zpracování na vlákno, aby se zamezilo abrazí. Apretura a další funkční materiály představují vrstvu mezi povrchem vlákna a matricí, proto mluvíme o mezní vrstvě nebo mezifázi.

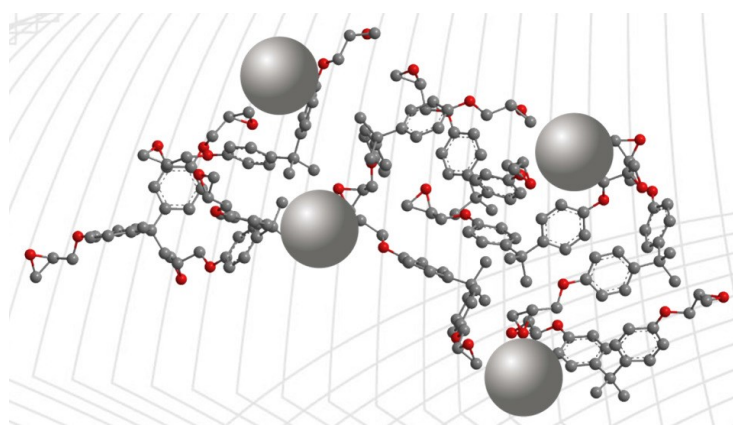
Lubrikace („*šlichty*“) jsou prostředky, které se v průběhu výroby nanáší na vlákna ve formě vodní emulze a plní několik funkcí:

- spojují jednotlivá vlákna do manipulovatelného spřádacího vlákna,
- chrání povrch křehkých elementárních vláken,
- přizpůsobují stávající vlákna dalšímu zpracovatelskému procesu,
- zlepšují vazby mezi organickou pryskyřicí a anorganickým vláknem.

Lubrikace obsahují zejména filmotvornou složku, maziva, apretace a antistatika. Správná adheze vlákna a matrice výrazně zlepšuje mechanické a tepelné vlastnosti výrobků. [1]

2.2.4 Vytvrzení epoxidové matrice

Vytvrzení epoxidových pryskyřic představuje stav, kdy je pryskyřice převedena do nerozpustného a nenatavitelného stavu. Pro vytvrzení jsou nutné reakce koncových epoxidových a hydroxylových skupin s více funkčními skupinami. Přechod epoxidových skupin na polyaminy a vznik sesíťované struktury vyžaduje použití polyaminu s minimálně třemi atomy vodíku. Na obr. 12 je názorně zobrazena síťovaná struktura polymeru. Nejčastěji používaná tvrdidla jsou polyaminy, polythioly, anhydridy polykarboxylových kyselin a pryskyřice obsahující methylolové skupiny (fenol, močovina).



Obr. 12 Síťovaná struktura polymerů pomocí příčných vazeb [16]

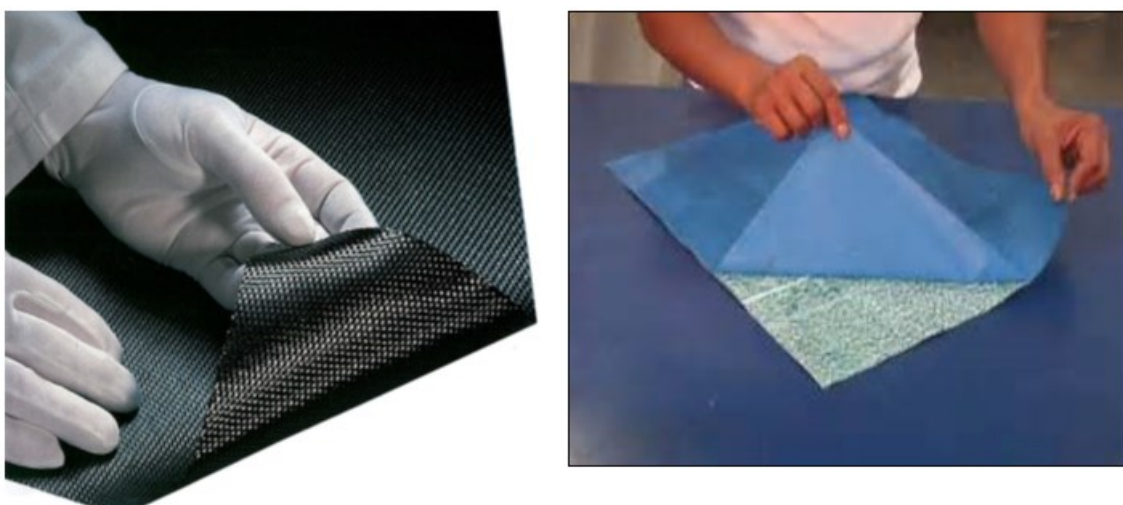
Proces vytvrzení probíhá u většiny pryskyřic během několika hodin, u některých až několik dnů. S použitím tvrdidel a za působení teploty (100 až 200°C) se tento proces výrazně zkracuje. Pro síťování pryskyřic s teplotou skelného přechodu T_g větším než pokojová teplota se v počátečním stupni výroby používá způsob pouze částečného vytvrzení matrice. Při tomto stavu pryskyřice pouze ztuhne ve tvaru vhodném k manipulaci. Výrobek je následně přemístěn do autoklávu nebo pece, kde pryskyřice vytvrdne.

Tyto pryskyřice mají schopnost setrvat po částečném vytvrzení (gelaci) ve zpracovatelném stavu (tzv. B-stage nebo B-stavu) až několik měsíců. V B-stavu má pryskyřice vysokou viskozitu a je částečně vytvrzená, ale můžeme s ní dále pracovat a tvarovat ji. Po docílení požadovaného tvaru (např. lisováním) je dokončeno vytvrzování za teploty vyšší než T_g (120 - 250°C). Tento postup je nazýván prepreg technologie tzv. výroba předem impregnovaných výztuží, ze kterých se vyrábějí kompozitní materiály např. pro letecký průmysl nebo sportovní potřeby. [17, 18]

3 PREPREGY

Kompozitní materiály nabízí ve své podstatě prakticky neomezené množství variací a složek výztuže a matrice. Rovněž technologií výroby kompozitů je značné množství a neustále se objevují nové modifikace stávajících výrobních postupů. Jak je již patrné z názvu diplomové práce je pozornost věnována zejména výrobě předimpregnovaných vláken s reaktoplastickou pryskyřicí.

Pro výrobu kompozitů se často používají předimpregnovaná vlákna tzv. prepregy. Prepreg systémy se nazývají polotovary k výrobě vláknových kompozitů, jejichž hlavní složkou je předimpregnovaná výztuž napuštěná částečně vytvrzenými pryskyřicemi. Prepreg je zkrácený tvar anglického slova *preimpregnated fibres*, což v překladu znamená: „předimpregnovaná vlákna“. Prepregy znázorněné na obr. 13 jsou polotovary plochého tvaru, se speciálně vyvinuté pryskyřičné matrice, které jsou vyztužené s umělými vlákny jako například uhlík, sklo a aramid. Tyto systémy se na sebe vrství do požadované tloušťky a ve formách se pak dotvarují a následně se dotvrdí působením tepla a tlaku. K impregnaci prepregů se nejčastěji používají nenasycené polyesterové pryskyřice, vinylové a epoxidové pryskyřice. Výsledný kompozitní materiál je vysoce pevný, teplotně odolný, mimořádně tuhý a extrémně lehký. Jednou z předností prepreg technologie je také jednodušší výrobní proces, kdy je strojově předimpregnována tkanina a vzniká kvalitní produkt s velmi nízkou objemovou hmotností a výbornými mechanickými vlastnostmi. [16]



Obr. 13 Prepregy [16, 17]

Zvláštní skupinou předimpregnovaných materiálů jsou tzv. lisovací těsta s výztužnými vlákny např. DMC (*dough moulding compounds*) a premixy – BMC (*bulk moulding compounds*).

Z prepregů se vyrábí především kompozitní díly pro letectví a kosmonautiku, ale další průmyslová odvětví včetně větrné energetiky, automobilový průmysl, sportovní zboží. Znamé jsou také technicky náročné produkty jako radarové dómy, náběhové a brzdové klapky, kryty komunikačních přístrojů a turbín. Z novějších aplikací je to výroba podmořských trubek pro těžbu ropy a zemního plynu nebo výroba vysokotlakých nádob. [1, 12, 16, 19]

3.1 Vlastnosti, rozdělení a postupy výroby prepregů

Při použití prepregů odpadá složitý proces prosycování výztuže pojivem od dalšího zpracování a to má zásadní vliv na kvalitu a vlastnosti budoucího výrobku. Nejčastěji se používají pro výrobu dílů lisováním nebo v autoklávu. Za kontrolovaných a reprodukovatelných podmínek dostáváme výrobek s výbornými mechanickými vlastnostmi. Předností prepregů je zejména vysoký podíl vláknové výztuže, stejnoměrnost a hladkost hotových dílů, které souvisí s předem definovatelným a přesným uložením výztuže. Nevýhodou je vyšší cena, poměrně značný odpad při zpracování a nutnost skladování při stanovených podmínkách. Při pokojové teplotě dochází k postupnému samovolnému vytvrzování pryskyřice při současné ztrátě tvarovatelnosti a lepivosti.

Výhody použití prepreg systémů při výrobě kompozitu:

- čistý proces,
- snadná manipulace,
- vysoký obsah vláken (až 65%),
- přesná kontrola obsahu pryskyřice,
- konstantní kvalita materiálu,
- úspora hmotnosti (ideální poměr hmotnosti a výkonu),
- vynikající kvalita impregnace,
- snadná výroba součástí (nižší náklady na zpracování, nižší spotřeba energie),
- vysoce výkonný kompozitní materiál.

Nevýhody nebo omezení při použití prepreg systémů při výrobě kompozitu:

- skladovatelnost,
- náklady,
- úložný prostor a skladování při nízkých teplotách.

Životnost nevytvrzeného prepregu:

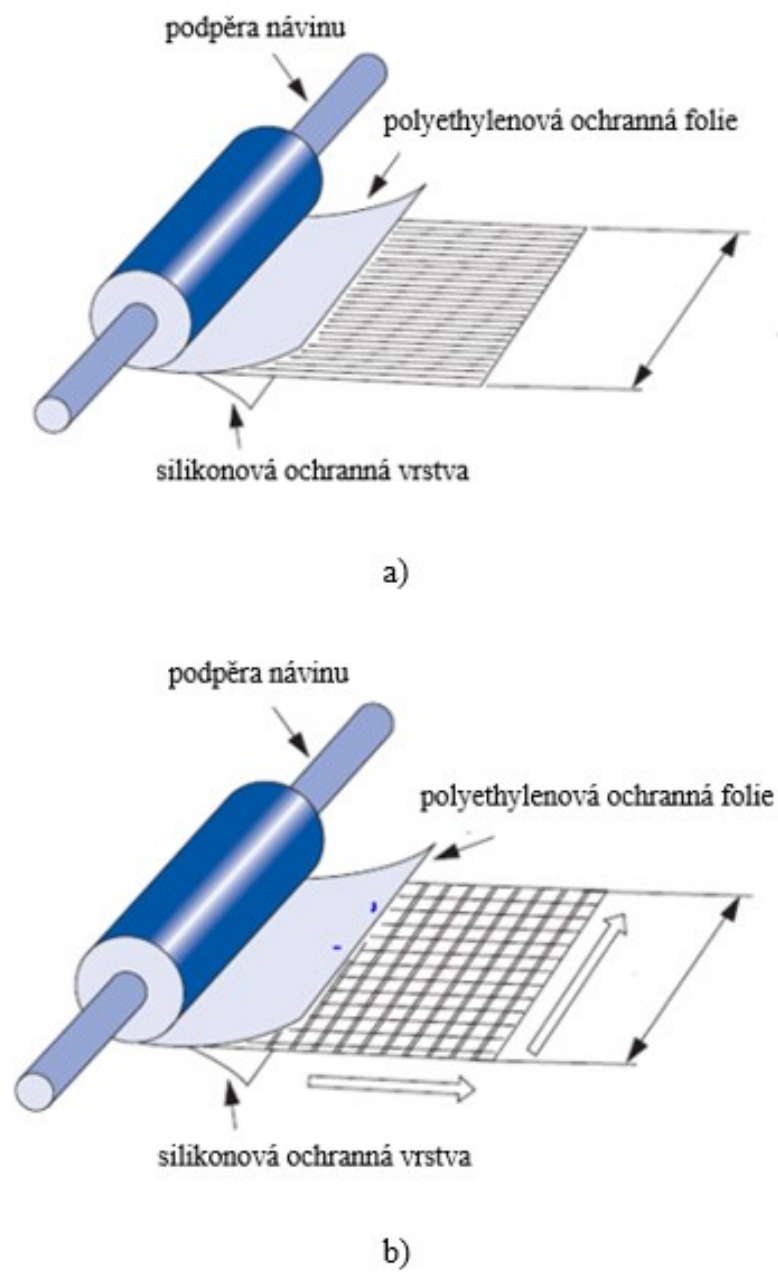
- za pokojové teploty omezená životnost (řádově dny až týdny),
- při uskladnění v mrazicím boxu při teplotě mínus 18°C životnost 6 až 12 měsíců.

Podle geometrie výztuže se dají rozeznávat prepregy:

- jednosměrné uspořádání vláken (UD prepreg), s tloušťkou běžně 0,1 - 0,15 mm a jako fólie s tloušťkou pod 25 mikronů vyrobené z rovingů,
- vícevrstvé s jednotlivými vrstvami tkanin kladenými nad sebou navzájem pod různými úhly,
- vícesměrné uspořádání vláken (tkaninový prepreg),
- kombinované s výztuží z tkanin a rohoží,
- s prostorově vázanou pletenou nebo tkanou výztuží,
- s výztuží ze sekaných vláken (technologie SMC).

Proces výroby prepregu představuje prosycení vláknové výztuže, většinou jednosměrného vlákna, tkaniny nebo více tkanin, pryskyřicí a následné překrytí vrstvou ochranné folie. Na obr. 14 je znázorněn výrobní proces s navinutím do zásobníkové role.

V současné době, s rostoucími požadavky na tzv. suchý způsob výroby kompozitních výrobků, někteří výrobci nabízejí alternativu výroby, která se nazývá semipreg. Tato technologie zachovává veškeré výhody práce s prepregem a předností je zejména to, že odpadá potřeba autokláv, vytvrzování probíhá při teplotě okolo 120°C. Tkanina je impregnována pouze z jedné strany foliovou pryskyřicí. Oblast použití výrobků je dána zejména parametry a variabilitou dané pryskyřice, ale nemůže dosáhnout všech parametrů prepregů použitých v autoklávu. Aplikace je zejména v letectví, automobilovém průmyslu, stavby lodí, zdravotnictví nebo sportovní potřeby. [20]



Obr. 14 Výrobní proces prepregu: a) jednosměrného vlákna,
b) tkaniny [12]

3.2 Základní fáze výroby prepregů

Prepregová technologie je technologie založená na principu využití polotovaru, který je tvořen výztuží prosycenou pojivem. V průběhu výroby kompozitu rozlišujeme tři základní fáze nebo stavy pojiva - pryskyřice. Tzv. „**A-stav**“, který představuje nevytvrzenou pryskyřici, tzv. „**B-stav**“ při kterém dochází k polymeraci pryskyřice (prepreg) a tzv. „**C-stav**“, což je konečná polymerizovaná matrice (kompozit). B-stav je přechodový stupeň polymerace mezi nevytvrzenou pryskyřicí a konečnou polymerizovanou matricí. Matrice v B-stavu je již částečně, ale velmi řídké zesíťována. Výsledný materiál prepreg má však omezenou zpracovatelnost především při pokojové teplotě, proto se musí většinou skladovat v mrazicím boxu. Zpracovatelnost při pokojové teplotě bývá podle typu materiálu jen několik dní. V tab. 4 je stručný popis výhod a nevýhod jednotlivých výrobních procesů v B-stavu výroby prepregů.

Výrobu prepregů v tzv. B-stavu lze rozdělit na tři následující způsoby:

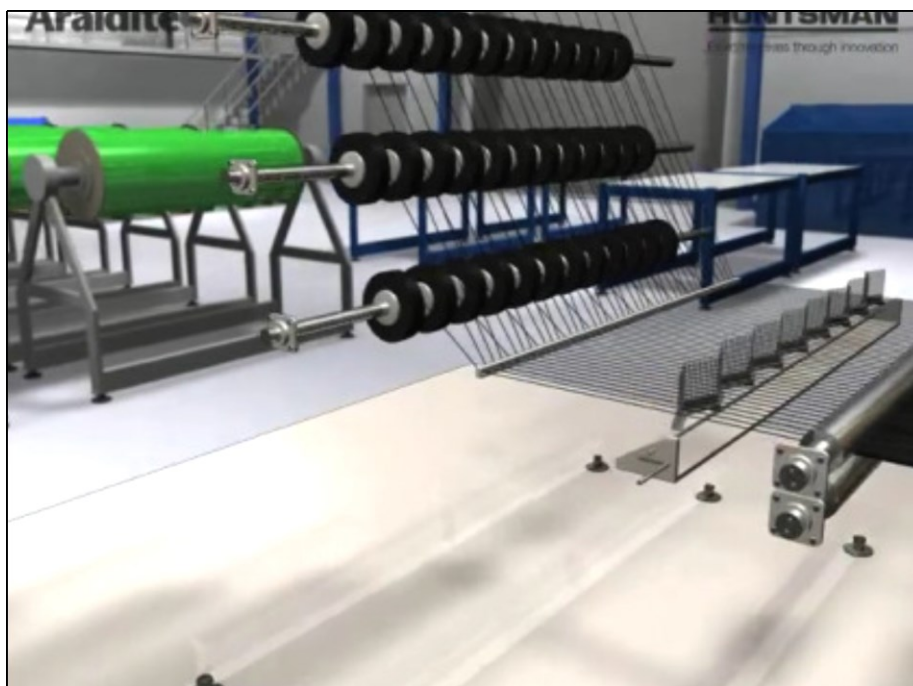
- Fyzikální B-stav: rozpouštědlový způsob výroby (Solvent Based Systems).
- Fyzikální B-stav: systém horké taveniny (Hot-melt Based Systems).
- Chemický B-stav.

Tab. 3 Porovnání jednotlivých výrobních procesů v B-stavu výroby prepregu. [16]

Typ procesu	Výhody	Nevýhody
rozpouštědlový způsob výroby	snadná impregnace nízká viskozita skladovatelnost	tvorba výparů rozpouštědel obsah zbytkového rozpouštědla riziko sedimentace
systém horké taveniny	snadná kontrola obsahu pryskyřice lepivost bez rozpouštědel	vysoká viskozita obtížná impregnace
chemický B-stav	snadná kontrola obsahu pryskyřice nastavitelná reaktivita bez rozpouštědel	riziko exotermní reakce reprodukovatelnost v lepivosti

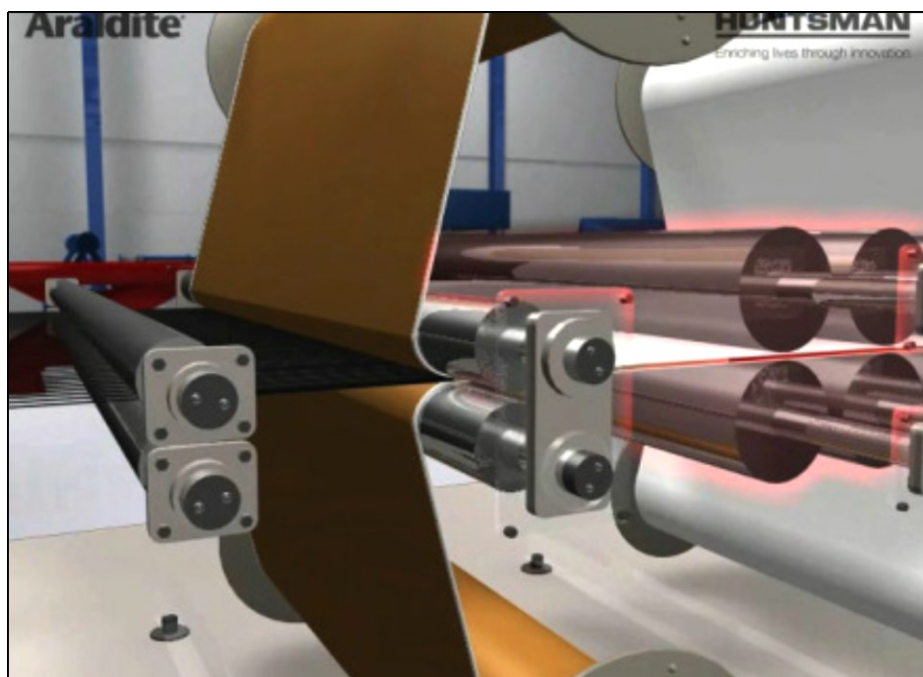
Celkový postupný proces výroby, skladování a zpracování prepregu je znázorněn na obr. 15 až 19. Pro příklad byl použit výrobní proces horké taveniny a vakuové zpracování prepregu v autoklávu. Výrobní proces představuje zpravidla tyto kroky: [16]

1. Příprava vlákna a matrice – jednosměrná vlákna prochází přes speciální hřebeny (obr. 15), kde dochází k usměrnění vláken. Plátna jsou odvíjena ze zásobníkové role. Pryskyřice je upravena dle procesu výroby (předehřev nebo rozpouštědla).

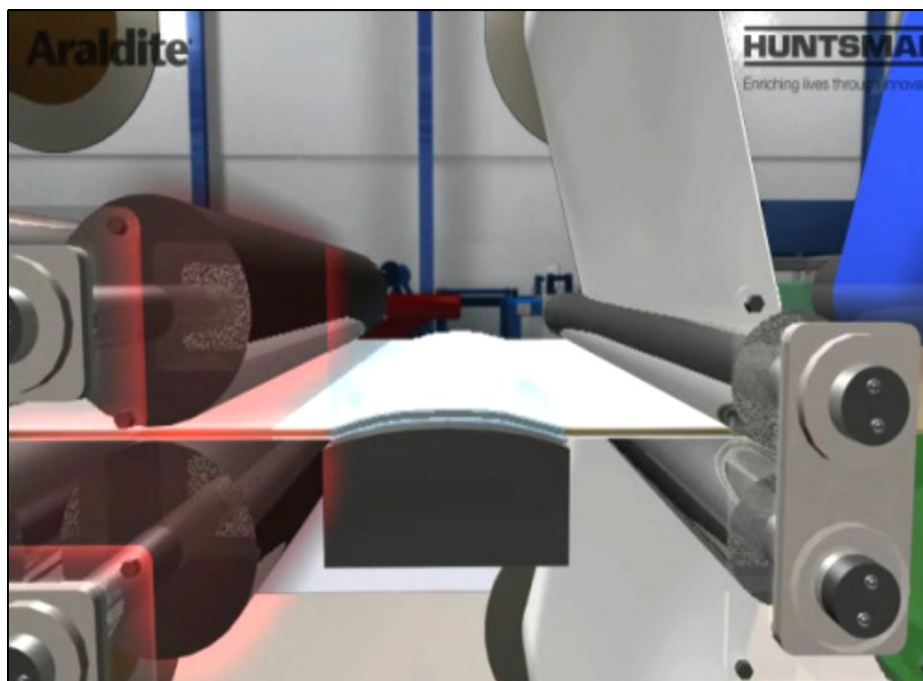


Obr. 15 Výrobní proces prepregu - úprava jednosměrného vlákna před impregnací [16]

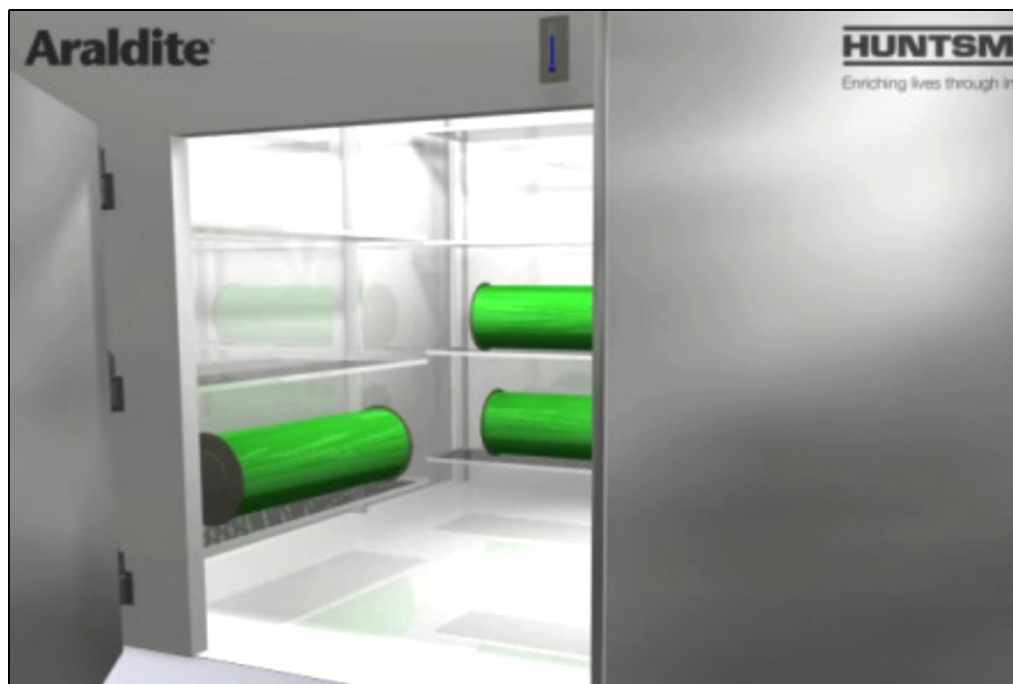
2. Impregnace vyztužujících vláken - navlhčení vláken se správným množstvím pryskyřice (obr. 16).
3. „B-stav“ – pryskyřice působením teploty a tlaku (obr. 17) popř. odparem rozpouštědel se dostává do fáze částečného zesíťování, dosahuje vysoké úrovně viskozity, neteče a při pokojové teplotě se může s prepregem pracovat.
4. Úložný prostor – skladování za stabilních podmínek v mrazicím boxu (obr. 18).
5. C-stav“ dosažení polymerizace působením teploty, tlakem nebo vakuově v autoklávu (obr. 19).



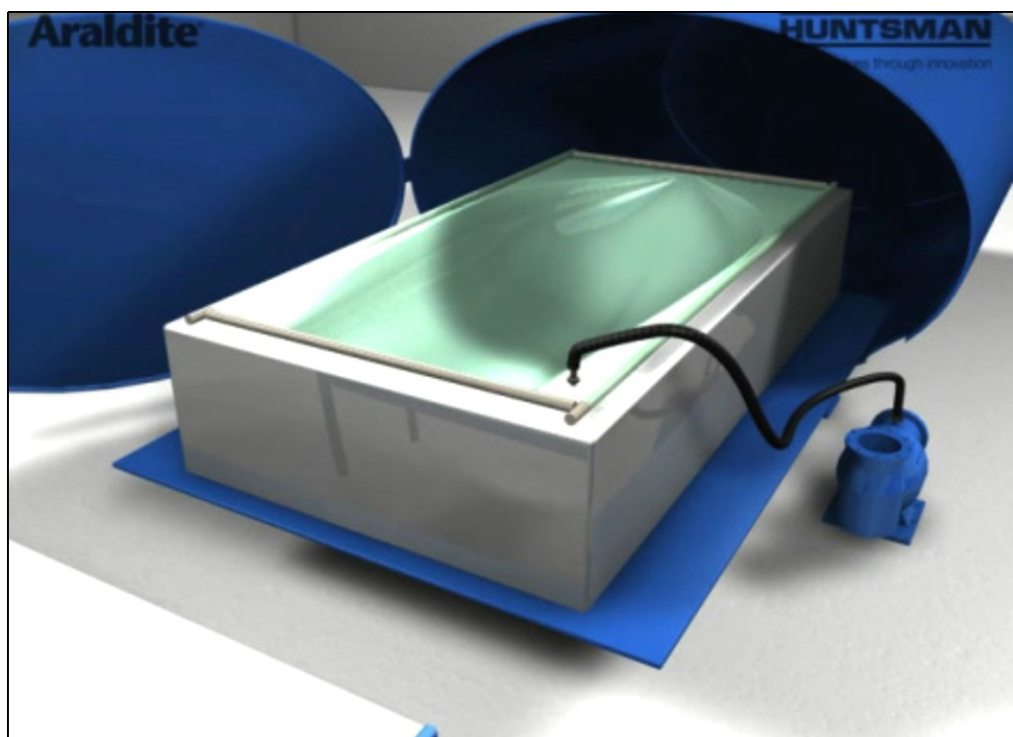
*Obr. 16 Výrobní proces prepregu – impregnace výztuže
(Hot-melt systém) [16]*



Obr. 17 Výrobní proces prepregu „B–stav“ [16]



Obr. 19 Proces uskladnění prepregu [16]

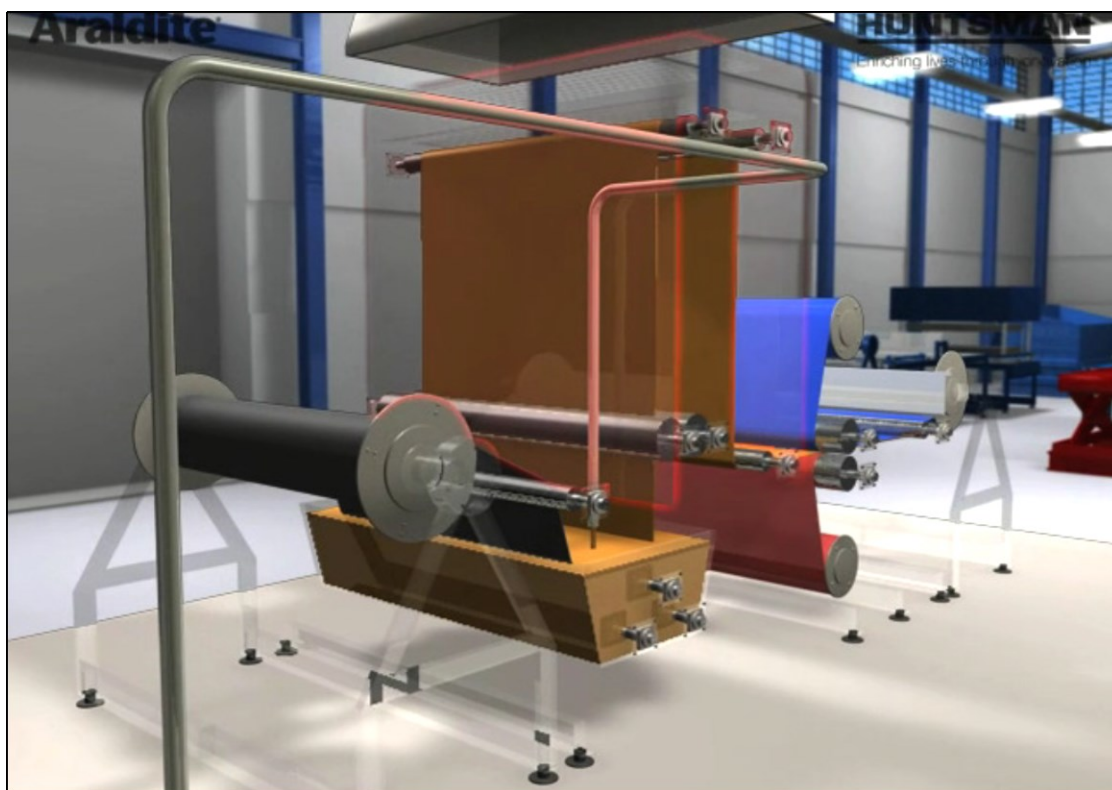


Obr. 18 Výrobní proces - vakuové zpracování prepregu v autoklávu [16]

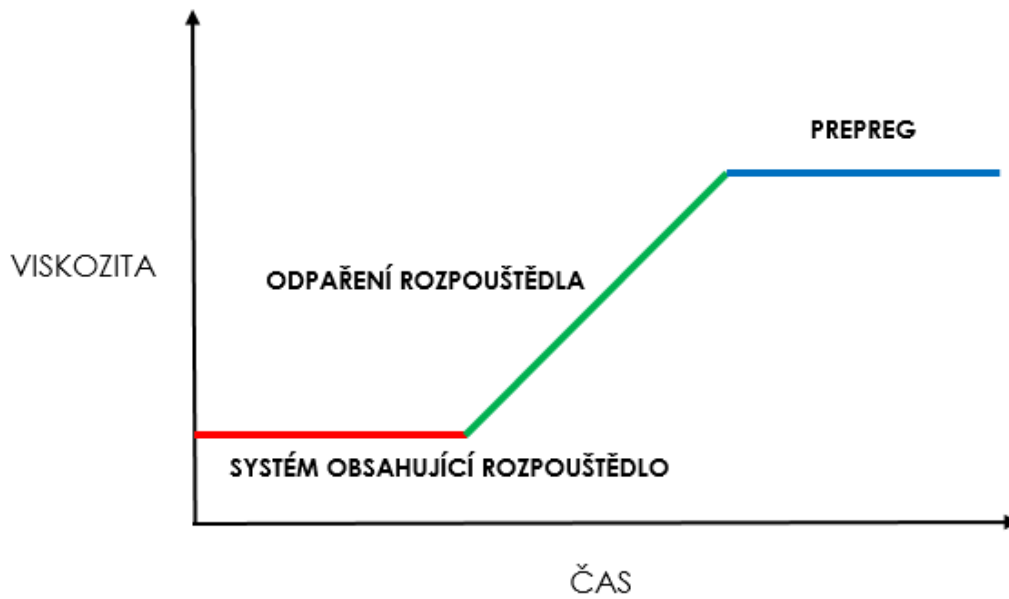
3.2.1 Rozpouštědlový způsob výroby prepregu

Rozpouštědlovým (Solvent) procesem výroby lze vyrábět pouze látkové prepregy a tento systém představuje výrobu prepregů pomocí rozpouštědel. Rozpouštědlo způsobí nízkou viskozitu pryskyřice a ta je za normální pokojové teploty nanášena na tkaninu. Na obr. 21 je znázorněn graf závislosti viskozity v čase výrobního systému.

Pryskyřice je smíchána v lázni s rozpouštědlem (alkohol, aceton apod.), do lázně je vedena vyztužující tkanina, která je nasycena pryskyřicí a následně prochází přes sadu válečků k odstranění přebytku pryskyřice do sušícího zařízení. V sušárně (sušící věži s ventilací) se rozpouštědlo odpaří a prepreg je rolován se speciální folií nebo papírem do zásobníkové role. Následně je role prepregu uložena v chladném prostředí pro další zpracování. Na obr. 20 je ukázka výrobního rozpouštědlového procesu a v tab. 4 nabídka a parametry složek firmy Huntsman. [16]



Obr. 20 Solvent prepreg systém – obrázek a výrobní schéma [16]



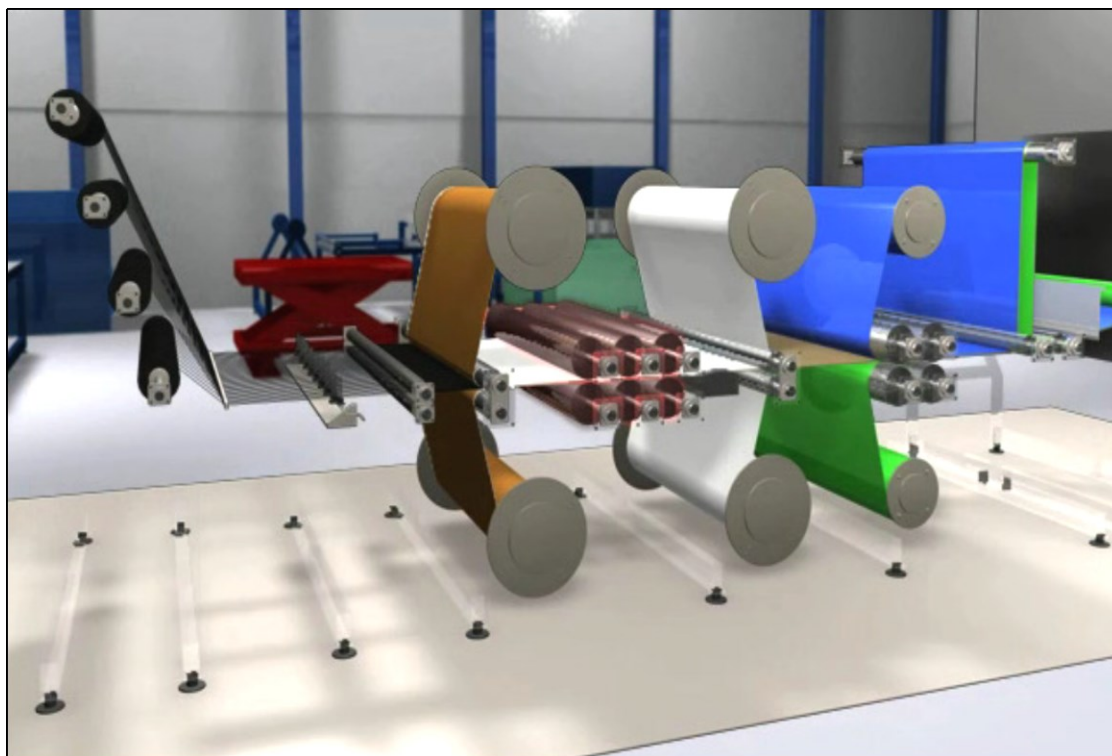
Obr. 21 Graf závislosti viskozity v čase výrobního rozpouštědlového způsobu
- Solvent prepreg systému [16]

Tab. 4 Rozpouštědlový způsob výroby - nabídka a parametry
složek firmy Huntsman [16]

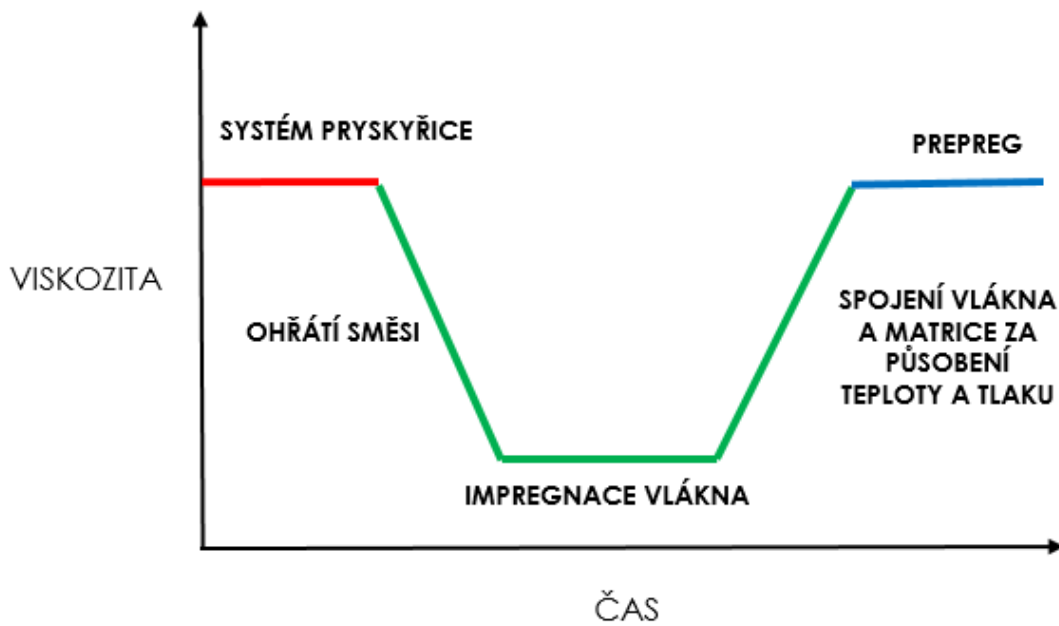
Rozpouštědlový způsob výroby prepreg systému - složky Huntsman						
Podmínky	Viskozita směsi při 25°C	Doba skladovatelnosti	Doba gelu při 120°C	Doporučený čas pro odpaření rozpouštědla/ podmínky pro vytvrzení	Max Tg	Modul pevnosti v ohybu
Jednotky	mPa.s	týden	minut		°C	%
Araldite® LZ 5021/ Aradur® 1571/ Accelerator 1573	550 - 850	9 - 12 měsíců	8 - 15	6 - 10 min. při 90°C/ 25 min. při 125°C	85 - 115	13,0 - 16,0
Araldite® LZ 3540/ Aradur® 1571/ Accelerator 1573	1 700 - 2 300	> 4	15 - 20	7 - 10 min. při 90°C/ 30 min. při 90°C + 1 hod. při 120°C	115 - 125	8,0 - 9,5
Resin XB 3542 Aradur® 1571/ Accelerator 1573	1 900 - 2 500 při 50°C	> 5	X.13	8 - 13 min. při 90°C/ 1 hod. při 120°C + 2 hod. při 140°C	140 - 145	4,5 - 6,5

3.2.2 Výroba prepregu pomocí metody horké taveniny

Výroba prepregu pomocí procesu horké taveniny (Hot-melt) představuje proces výroby založený na působení tepla a tlaku. Výztuží mohou být jednosměrná vlákna nebo textilie (tkanina). Skládá se ze dvou výrobních fází (dvoustupňový proces). První stupeň zahrnuje potažení papírového podkladu tenkou vrstvou teplé pryskyřice. V druhém stupni dochází k impregnaci vláken nebo textilie a k spojení pryskyřice s vyztužujícím vláknem. Na vyhřívaných hutních válcích je za působení tepla a tlaku pryskyřice impregnována do vlákna a dochází k trvalému spojení. Prosycená vlákna jsou následně vedena přes chladicí válečky, je odstraněna vrstva papírového podkladu, která sloužila jako nosič pryskyřice a prepreg je rolován se speciální folií nebo papírem do zásobníkové role. Výrobní proces je zobrazen na obr. 22. Následně je role prepregu uložena v chladném prostředí pro další zpracování. Na obr. 23 je znázorněn graf závislosti viskozity v čase výrobního systému. V tab. 5 je ukázka jednotlivých složek kompozitu a parametrů výrobního programu firmy Huntsman. [16]



Obr. 22 Metoda horké taveniny výroby prepregu [16]



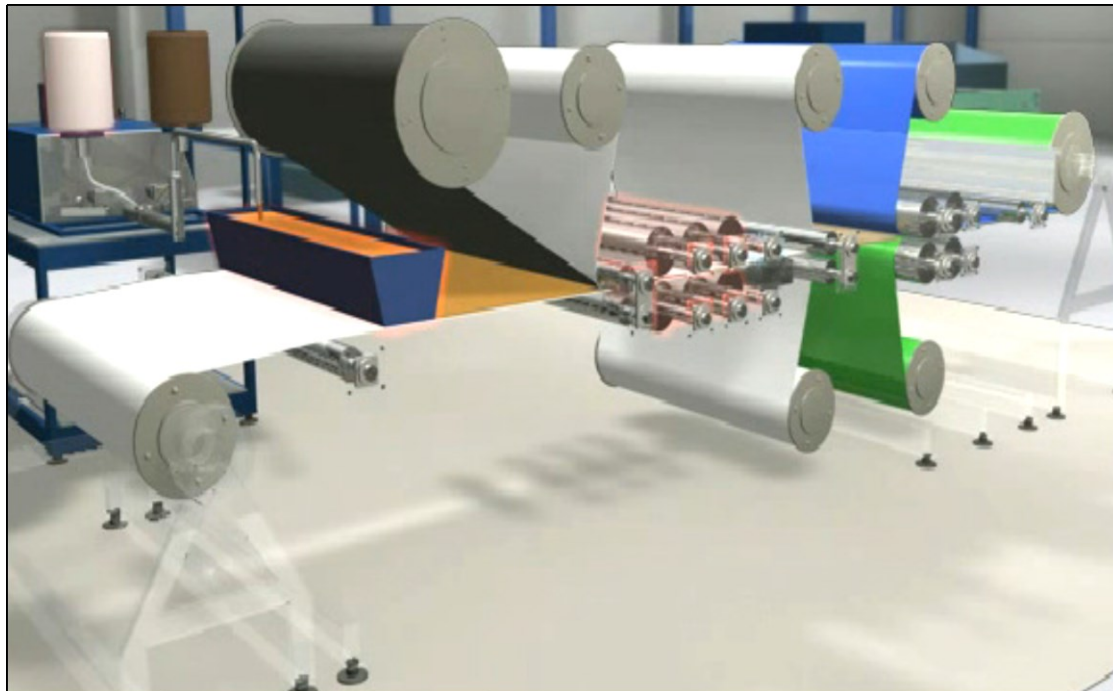
Obr. 23 Graf závislosti viskozity v čase výrobního Hot-melt systému [16]

Tab. 5 Výrobní metoda horké taveniny - nabídka a parametry složek firmy Huntsman [16]

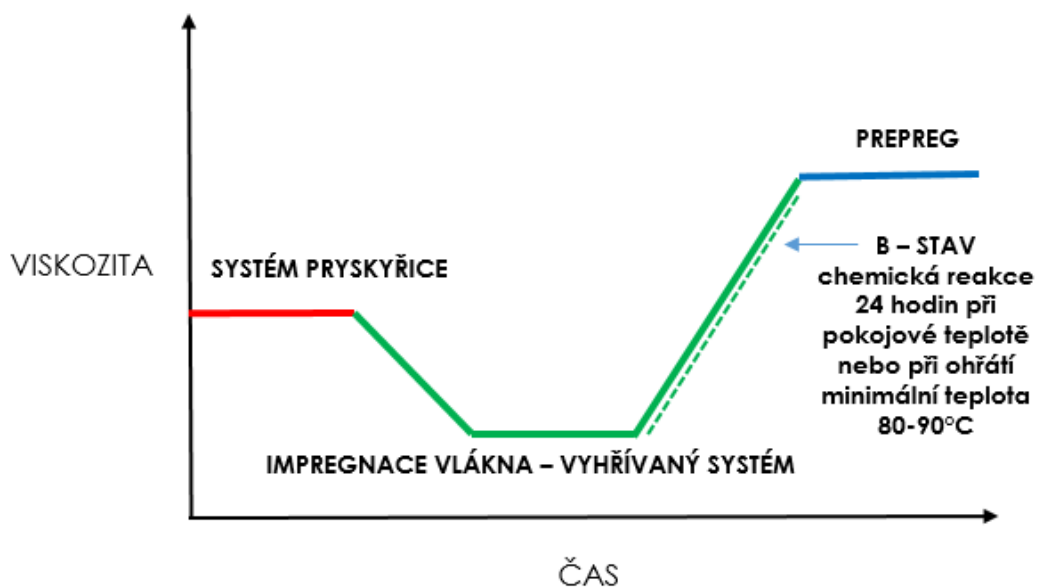
Výrobní metoda horké taveniny - složky Huntsman						
Podmínky	Viskozita směsi při 25°C	Doba skladovatelnosti	Doba gelu při 120°C	Doporučený čas pro odpaření rozpouštědla/ podmínky pro vytvrzení	Max. Tg	Modul pevnosti v ohybu
Jednotky	mPa.s	týden	minut		°C	%
Araldite® LY 3514/ Aradur® 1571/ Accelerator 1573	14 000 - 15 000 při 70°C	> 5	17 - 21	30 min. při 90°C/ + 2 hod. při 120°C	120 - 130	6,0 - 9,0
Resin XB 3515 Aradur® 1571/ Accelerator 1573	24 000 - 28 000 při 55°C	> 5	10 - 13	1 hod. při 120°C + 2 hod. při 140°C	140 - 145	4,5 - 6,5

3.2.3 Chemický B-stav výroby prepregu

Chemický prepreg výrobní systém je podobný systém jako u metody horké taveniny, také představuje výrobu prepregu pomocí horké taveniny za působení tepla a tlaku. Výztuž mohou být jednosměrná vlákna nebo textilie (tkanina). Tento systém však není dvoustupňový, ale pryskyřice s nízkou viskozitou je nanášena na papír společně s vyztužujícími vlákny. Na vyhřívaných hutních válcích je za působení tepla a tlaku pryskyřice impregnována do vlákna a dochází ke spojení vlákna a matrice. Prosycená vlákna jsou vedena přes chladicí válečky a prepreg je rolován se speciální folií nebo papírem do zásobníkové role. K částečnému zesíťování tzv. B-stavové reakci dochází v peci při minimální teplotě 80 - 90°C (rozsah teplot 80 - 140°C) nebo za pokojové teploty po dobu min. 24 hodin. Výrobní proces je zobrazen na obr. 24. Následně je role prepregu uložena v chladném prostředí pro další zpracování. Na obr. 25 je znázorněn graf závislosti viskozity v čase výrobního systému. V tab. 6 je ukázka jednotlivých složek kompozitu a parametrů výrobního programu firmy Huntsman. [16]



Obr. 24 Chemický B-stav výrobní proces výroby prepregu [16]



Obr. 25 Graf závislosti viskozity v čase výrobního chemického B-stav systému [16]

Tab. 6 Chemický B-stav výrobní systém - nabídka a parametry složek firmy Huntsman [16]

Chemický výrobní prepreg systému - složky Huntsman						
Podmínky	Viskozita směsi při 25°C	Doba skladovatelnosti	Doba gelu při 120°C	Doporučený čas pro odpaření rozpouštědla/ podmínky pro vytvrzení	Max. Tg	Modul pevnosti v ohybu
Jednotky	mPa.s	týden	minut		°C	%
Araldite® LY 1556/ Aradur® 1571/ Accelerator 1573 Hardener XB 3403	4 000 - 6 000	> 6	6 - 11	24 - 28 hod. při 23°C/ 2 hod. při 120°C	105 - 115	7,0 - 10,0
Araldite® LY 1556/ Aradur® 1571/ Accelerator 1573 Hardener XB 3471	5 000 - 5 900	> 6	5 - 12	2 - 3 min. při 80 - 90°C/ 2 hod. při 120°C	115 - 125	5,5 - 8,5
Resin XU 3508 Aradur® 1571/ Accelerator 1573 Hardener XB 3403	6 650 - 7 450	> 4	4 - 12	24 hod. při 23°C/ 4 hod. při 120°C	115 - 125	5,5 - 8,0
Resin XU 3508 Aradur® 1571/ Accelerator 1573 Hardener XB 3471	5 900 - 6 200	> 4	4 - 8	2 - 3 min. při 90°C/ 4 hod. při 120°C	120 - 140	6,0 - 10,0
Araldite® LY 5150/ Aradur® 1571/ Accelerator 1573 Hardener XB 3471	3 500 - 4 500 při 50°C	> 8	10 - 28	1 - 3 min. při 80 - 90°C/ 1 hod. při 140°C	140 - 155	4,0 - 8,0

3.3 Podniky působící v oblasti výroby prepregů

Výrobou prepreg systémů se zabývá poměrně málo firem a v České republice se prepregy nevyrábí pouze zpracovávají. Mezi hlavní velké společnosti, které se podílejí na výrobě prepregů jsou například firmy: [21]

- HEXCEL (USA) nabízí HexPly® prepregy pro průmyslové aplikace s fenolickou, epoxidovou nebo BMI pryskyřicovou matricí vyztuženou skelnými a uhlíkovými jednosměrnými vlákny nebo textiliemi.
- TenCate Advanced Composites (USA) je výrobce kompozitů, které jsou široce používány v leteckém průmyslu od předních společností jako je Lockheed Martin, General Atomics, Gulfstream a Cirrus Aircraft. Například do výrobního programu společnosti patří konstrukce křídla a trupu letounu CIRRUS SR-22.
- Prepreg-ACM CJSC (Moskva) vyrábí prepregy pro polymerní kompozity, které mají vysoce kvalitní minerální a uhlíková vlákna plněné epoxidovou a polyimidovou pryskyřicí. Tyto prepregy nacházejí uplatnění v mnoha oblastech, včetně leteckého průmyslu, stavebnictví a větrné energetice.
- SGL Group (Německo) je světová jednička v oblasti výrobků na bázi uhlíku. Má sofistikované prepreg výrobní závody v různých lokalitách. Jeho hlavní produkty jsou SIGRAFIL® uhlíková vlákna na bázi jednosměrného prepregu a SIGRATEX® tkaniny prepregů skládají z uhlíkových vláken z tkaniny.
- Axiom Materials (USA) je významným světovým výrobcem kompozitních materiálů, nabízí vysoce kvalitní prepregy a dalších kompozitní výrobky. Vyrábí široký sortiment prepregů jako jsou například tavné prepregy, prepregy s tkaným skleněným, aramidovým, uhlíkovým vláknem nebo prepregy z jednosměrných vláken.
- Delta-Tech a Delta-Preg (Itálie) jsou společnosti vyrábějící produkty a služby v oblasti kompozitních materiálů. Delta-Tech vyvíjí a vyrábí pryskyřice a Delta-Preg vyrábí prepregy pomocí matric dodaných společností Delta–Tech. Výrobní sortiment prepreg výrobků zahrnuje tkaniny, multiaxiální tkaniny, jednosměrné pásy zhotovené vrstvou rozpouštědla nebo technologií tavného válcování. Většina výroby je založena na uhlíkových vláknech, ale používají také další vlákna jako skleněná nebo aramidová.

4 TECHNOLOGIE VÝROBY KOMPOZITŮ Z PREPREGŮ

Technologii výroby kompozitů lze rozdělit zejména dle formy – otevřená (jednodílná) nebo uzavřená forma. Typ formy je rozhodující pro odpařování reaktivního ředidla pryskyřice levných UP (*Unsaturated Polyester*) a VE (*Vinyl Ester*) pryskyřic. Technologie následujícího zpracování se volí podle použitých materiálů a druhu výsledného kompozitu. Ke známým způsobům výroby patří například:

- ruční kladení prepregu a vytvrzování v autoklávu,
- strojní kladení prepregu s reaktoplastickou matricí ATL (*Automated Tape Laying*) a vytvrzování v autoklávu,
- kladení rovingového prepregu na otáčející se trn AFP (*Automated Fiber Placement*),
- strojní kladení termoplastických prepregů,
- šroubovicové navíjení za mokra,
- pultruze.

V tlakové nádobě tzv. autoklávu je provedeno vakuování dílu, kdy po odsátí vzduchu z vaku přitlačuje a spojuje jednotlivé vrstvy atmosférický tlak. Po ohřátí autoklávu na požadovanou teplotu 120°C až 200°C nastává proces vytvrzení pryskyřice. Následným zvýšením tlaku v autoklávu se ještě lépe spojí jednotlivé vrstvy prepregů a je zaručeno dokonalé minimální množství pryskyřice. Čas působení teploty a tlaku je závislý na rychlosti vytvrzování dané pryskyřice a určuje ho diagram TTT (*Temperature Time Transformation*). Chladnutí dílu je velmi pomalé, aby nedocházelo k vnitřnímu pnutí v laminátu. Vulkanizační kotle a autoklávy jsou tlakové nádoby s možností ohřevu případně i chlazení. Dnešní prepregy s epoxidovými a bismaleimidovými pryskyřicemi umožňují výrobu rozměrných dílů pro letectví bez použití autoklávu. Tato technologie se nazývá tzv. OOA technologie (*Out of Autoclave*) a je výrazně výrobně levnější a dovoluje použití též ATP technologie. Nahrazení použití autoklávu umožňuje také mikrovlnný ohřev RF (*Radio Frequency*), který představuje snížení energií na výrobu cca o 80 % a zkrácení výrobního času cca o 40 %. Nevýhodou je pouze použití materiálů neobsahujících kovy, sklo a skleněná vlákna a další materiály s rozdílnou schopností pohlcovat vlny. [22, 23]

4.1 Ruční kladení

Ručním pokládáním výztuže na otevřenou formu lze vyrobit velmi rozměrné výrobky. Tato technologie se používá převážně pro kusovou výrobu mechanicky namáhaných kompozitních dílů. Do otevřené formy se postupně vkládají vrstvy folií, tkanin a prepregů dle předem určené skladby výrobku. Těsnost prostoru zajišťuje polymerní folie, obvykle z PA nebo elastomerní vak ze silikonového kaučuky, který lze opakovaně použít. V tlakové nádobě tzv. autoklávu je provedeno vakuování dílu a za působení teploty 120°C až 200°C nastává proces vytvrzování pryskyřice.

Vzhledem k vysokému poměru vlákna v prepregu vzniká vytvrzováním kompozitní výrobek s výbornými mechanickými vlastnostmi. Vhodnou orientací prepregu při skladbě materiálu je možné tyto vlastnosti měnit v závislosti od směru namáhání. [8]

4.2 Strojní kladení prepregů – ATL

ATL (*Automated Tape Laying*) je technologie kladení prepregů pomocí kladečích strojů, rozlišujeme je na:

- CTLM (*Coutour Tape Layer Machine*) – většina dnes používaných strojů,
- FTLM (*Flat Tape Layer Machine*).

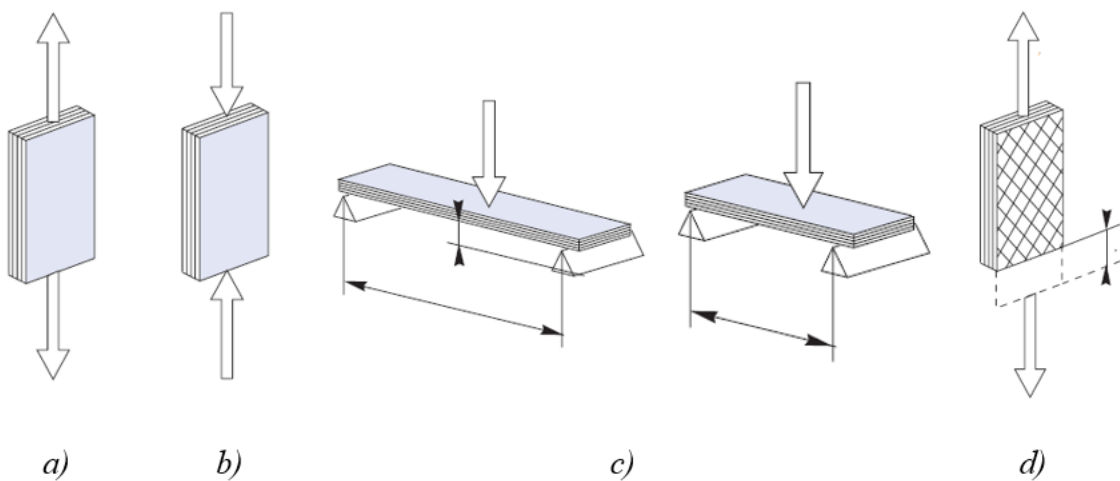
Počítačem řízené stroje jsou vybaveny kladečí hlavou s dostatečným stupněm volnosti, která se pohybuje nad otevřenou formou. Stroj pomocí kladečí hlavy sejme separační fólii, předehřeje prepreg s reaktoplastickou matricí a přitiskne k předchozím vrstvám a odřízne přebytečný prepreg. Tento proces je značně rychlý, levnější a vylučuje selhání člověka. Používá se například k výrobě křídel Boeing 787. [8]

4.3 Navíjení pramenového prepregu - AFP

AFP (*Automated Fiber Placement*) technologie dokáže, oproti klasickému navíjení za mokra, vyrobit také tvary s konkávními plochami. Vhodné pro střední až velké komplexní zakřivené monolitické díly. Dnes se touto metodou vyrábí například vstupní kanály vzduchu pro proudový motor letadla JSF F22 Raptor. [8]

5 ZKOUŠKY MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ

Vlastnosti kompozitních materiálů a jejich chování při mechanickém namáhání je dána vytvrzením matrice, rozložením plniva nebo vláken, orientací a obsahem vláken. Závislost kompozitů na teplotě, době zatížení a podmínkách prostředí není tak výrazná jako u nevyztužených plastů. Mechanické vlastnosti kompozitních materiálů jsou zejména pevnost, pružnost, plasticita a houževnatost. Mechanické charakteristiky, které určují parametry materiálů, můžeme rozdělit na krátkodobé, dlouhodobé, statické nebo dynamické, tahové, tlakové, ohybové nebo smykové. Základní druhy zkoušek mechanických vlastností kompozitů jsou znázorněny na obr. 26. Při namáhání zkušebních těles dochází k jejich deformaci, působením vnější síly mění svůj tvar. V případě, že se těleso vrátí do původního tvaru jde o elastickou (pružnou) deformaci a pokud se nevrátí do původního tvaru jedná se o plastickou (trvalou) deformaci. [1]

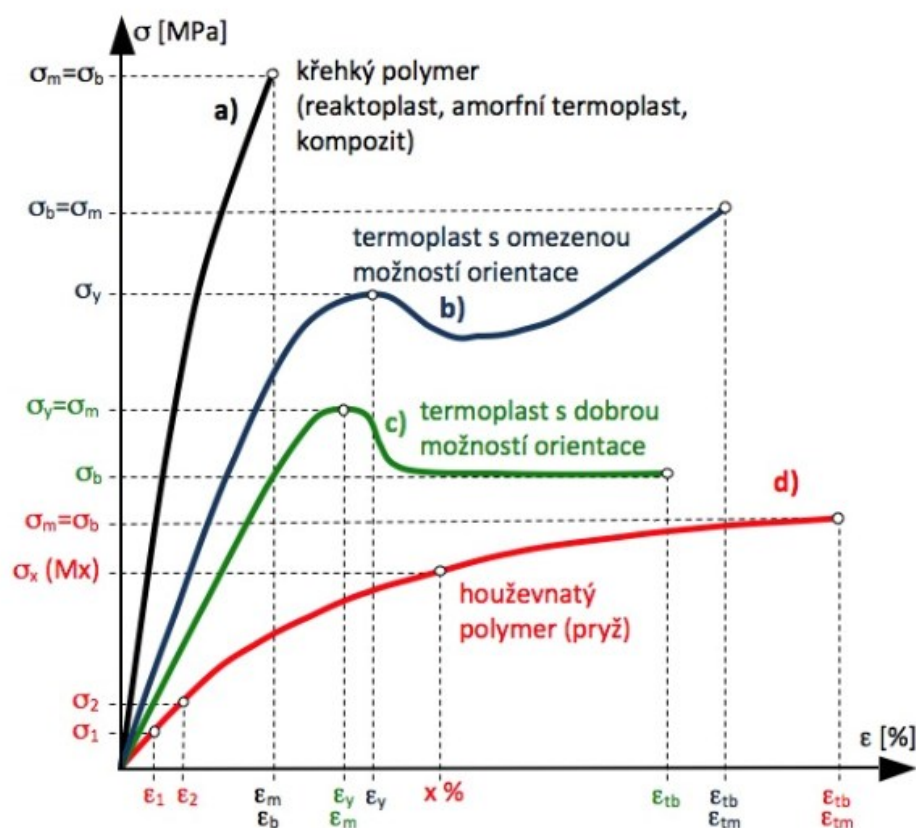


Obr. 26 Základní zkoušky kompozitních materiálů: a) pevnost v tahu, b) pevnost v tlaku, c) ohybová zkouška, d) smyková pevnost [12]

5.1 Statická tahová zkouška

Tahová zkouška patří k základním mechanickým zkouškám vlastností polymerů. Pomocí tzv. deformačních křivek můžeme, při jednoosém namáhání zkušební tělesa, sledovat průběh deformace (poměrné prodloužení v závislosti na normálovém napětí).

Deformační křivky nám určují důležité informace o vlastnostech materiálu a pevnostní charakteristiky jako je mez pevnosti, napětí na mezi kluzu a napětí při přetržení. Typické deformační křivky polymerů namáhaných v tahu jsou zobrazeny na obr. 27.



Obr. 27 Typické deformační křivky polymerů v tahu: a - křehké polymery; b, c - houževnaté polymery s mezí kluzu; d - houževnaté polymery bez meze kluzu

Zkušební těleso je uchyceno do čelisti zkušebního stroje a během zkoušky se zaznamenává závislost působící síly F , to znamená napětí σ (snímané dynamometrem) na poměrném prodloužení ϵ zkušební vzorku (snímané průtahoměrem).

Pro výpočet smluvního napětí σ platí rovnice (1) a pro výpočet poměrného prodloužení ε platí rovnice (2).

$$\sigma = \frac{F}{S_0} \quad [\text{MPa}] \quad (1)$$

Kde F je velikost působící síly v N, S_0 je původní průřez zkušebního tělesa v mm^2 .

$$\varepsilon = \frac{\Delta L_0}{L_0} \cdot 100 \quad [\%] \quad (2)$$

L_0 je počáteční měřená délka zkušebního tělesa v mm, ΔL_0 je zvětšení počáteční měřené délky v mm.

Mez pevnosti σ_m – je maximální napětí v tahu, které odpovídá největší síle F_{\max} naměřené v průběhu zkoušky, jeho hodnota je stanovena na základě rovnice (3).

$$\sigma_m = \frac{F_{\max}}{S_0} \quad [\text{MPa}] \quad (3)$$

Napětí na mezi kluzu σ_y – je napětí, při kterém začíná vznikat plastická (trvalá) deformace. Tuto hodnotu považujeme za horní hranici přípustného napětí při provozu součástí, při překročení již vzniká trvalá deformace.

Napětí při přetržení σ_b – je napětí, kdy dojde k porušení zkušební vzorku. U křehkých polymerů (např. reaktoplastů nebo kompozitů) může být toto napětí shodné s napětím na mezi pevnosti.

Modul pružnosti E - vyjadřuje tuhost materiálu, čím je vyšší hodnota, tím vyšší je jeho tuhost. E se stanovuje z deformačních křivek v oblasti, kde je patrná lineární závislost napětí σ na poměrném prodloužení ε . Jeho hodnota je stanovena na základě rovnice (4).

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad [\text{MPa}] \quad (4)$$

Pro tuto oblast platí tzv. Hookův zákon, který říká, že deformace je přímo úměrná napětí materiálu. Popisuje pružnou deformaci za působení malých sil, která po odlehčení vymizí.

Vztah mezi poměrným zúžením a poměrným prodloužením je tzv. Poissonův poměr μ . Čím je jeho hodnota vyšší, tím je polymerní materiál poddajnější. Délková změna zkušebního tělesa se v jakémkoliv stadiu měření, tedy i v okamžiku přetržení, vyjadřuje v %. [24]

II. PRAKTICKÁ ČÁST

6 CÍLE DIPLOMOVÉ PRÁCE

Praktická část diplomové práce se zabývá výrobou dvou sérií zkušebních vzorků kompozitního materiálu z polymerní matrice vhodné pro prepreg systémy. Kompozitní materiál vzorků je tvořen epoxidovou pryskyřicí dvou výrobců a byly použity různé vrstvy skelné výztuže. Výsledky měření a následná zhodnocení výsledků nám prověří vliv složení matrice, teploty a času vytvrzení na konečných mechanických vlastnostech kompozitního materiálu.

Součástí diplomové práce jsou následující cíle řešení.

- Studium polymerního kompozitního materiálu, matrice a výztuže.
- Seznámení se způsoby výroby prepreg systémů a výroby kompozitů z prepregů.
- Návrh matrice pro prepreg systémy a výběr výztuže pro zkušební vzorky.
- Výroba zkušebních prepreg vzorků s různým počtem vrstev.
- Vytvrzení kompozitního materiálu ve vyhřívaném lisu dle navržených systémů.
- Experimentální zkoušky mechanických vlastností kompozitu – tahová zkouška dle ČSN EN ISO 527-4.
- Vyhodnocení zkušebních vzorků a diskuze dosažených výsledků.
- Závěr.

7 MATERIÁLY A ZAŘÍZENÍ PRO ZKUŠEBNÍ VZORKY

7.1 Výztuž – tkanina Aeroglass 200

Jako výztuž kompozitního vzorku jsme zvolili středně hrubou skelnou tkaninu Aeroglass 200 (198 g/m²) od dodavatele Havel Composites CZ s.r.o. Je to kvalitní skelná tkanina používaná pro většinu pryskyřic, je vhodná jako univerzální konstrukční tkanina, která díky své konstrukci se při střihání netřepí a nevypadávají uvolněná vlákna, je odolná proti defektům při manipulaci a ukládání do forem.

Tkaniny Aeroglass jsou vyrobeny ze skelné příze typu E (66tex 16x13/cm). Základem E skla je soustava oxidů SiO₂, Al₂O₃, CaO, MgO, B₂O₃. Při úpravě vláken se nepoužívá vosk, proto jsou vlákna vhodná pro epoxidové pryskyřice. Tkaniny upravené voskem se dobře a rychle tkají, vlákna kloužou a nezadržávají se, nejsou však vhodné pro výrobu laminátu. Vlákna upravená voskem se používají pouze pro pryskyřice s obsahem styrenu (polyestery a vinylestery), ale i zde vosk rozpuštěný v pryskyřici snižuje adhezi mezi jednotlivými vrstvami. Technický list tkaniny Aeroglass 200 je součástí přílohy P 1.

Aeroglass skelné tkaniny jsou vhodné pro výrobu letadel, lodí, autodílů, sportovního nářadí, průmyslových výrobků, krytů a dalších výrobků zejména s požadavkem na velkou pevnost a dlouhou životnost. [25]



Obr. 28 Skelná tkanina AEROGLOSS 200 [25]

7.2 Polymerní matrice Araldite LY 1556

Tuto polymerní matrici nabízí firma Huntsman Advanced Materials a je určená pro vysoce výkonné kompozitní materiály a prepreg systémy. Pryskyřice vykazuje zejména extrémně dlouhou dobu zpracovatelnosti a výsledný kompozit má chemickou odolnost proti kyselinám při teplotě do 176°C. Zpracování prepregu je metodou chemického B-stavu a pro výsledný kompozitní materiál jsou doporučeny výrobní způsoby navíjení, pultruze a tlakové lití.

Pryskyřice vytvrzuje pouze nad 80°C do teploty 160°C, která určuje tepelnou odolnost systému (nevytvvrzuje při pokojové teplotě). V tab. 7 jsou základní parametry polymerní matrice Araldite, doba vytvrzení pryskyřice, poměry složek a viskozita jednotlivých systémů. Technický list je součástí přílohy P 2. [16]

Tab. 7 Parametry aplikace Araldite LY 1556 [16]

Araldite LY 1556			
Doba zpracovatelnosti pryskyřice			
teplota °C	system 1	system 2	system 3
110°C	18 - 22 min	13 - 17 min	11 - 15 min
120°C	8 - 12 min	6 - 10 min	5 - 9 min
130°C	4 - 6 min	2 - 5 min	2 - 5 min
Mísicí poměr jednotlivých složek			
složka	system 1	system 2	system 3
Araldite LY 1556	100	100	100
Aradur 1571	23	23	23
Accelerator 1573	3	5	7
Hardener XB 3471	14	14	14
Počáteční viskozita při 25°C			
mPa.s	5.000 - 5.500	5.400 - 5.800	5.500 - 5.900

7.2.1 Araldite® LY 1556

Nemodifikovaná epoxidová pryskyřice na bázi bisfenolu A, střední viskozity. Má výborné mechanické vlastnosti, vysokou rozměrovou stálost, odolnost vůči chemikáliím. Pryskyřice má malou tendenci krystalizovat a dobrou přilnavost k povrchu. V případě zákalu a krystalizace složky může být obnoven při zahřátí na 60 až 80°C.

Skladování: na suchém místě v původním uzavřeném obalu při teplotě 2 až 40°C, složka nesmí být vystavena přímému slunečnímu záření, působení tepla a vlhkosti. Za těchto podmínek skladování je skladovatelnost 6 let. Parametry složky Araldite® LY 1556 jsou v tab. 8. [16]

Tab. 8 Parametry složky Araldite LY 1556 [16]

Araldite® LY 1556	
parametr	hodnota
viskozita při 25°C (ISO 2719)	10.000 - 12.000 mPa.s
bod vzplanutí (ISO 2719)	> 200°C
hustota při 25°C (ISO 1675)	1,15 - 1,2 g/cm ³
skladovací teplota	2 - 40°C

7.2.2 Aradur® 1571

Vytvrzovací složka. Homogenní disperze bez aglomerátů, obsahuje přesný a konzistentní obsah dikyandiamidu. Snadná manipulace a míchání s pryskyřicí.

Skladování: na suchém větraném místě v původním uzavřeném obalu při teplotě 8 až 40°C, složka nesmí být vystavena přímému slunečnímu záření, působení tepla a vlhkosti. Za těchto podmínek skladování je skladovatelnost 2 roky. Parametry složky Aradur® 1571 jsou v tab. 9. [16]

Tab. 9 Parametry složky Aradur 1571[16]

Aradur® 1571	
parametr	hodnota
viskozita při 25°C (ISO 2719)	28.000 - 40.000 mPa.s
hustota při 25°C (ISO 1675)	1,2 g/cm ³
skladovací teplota	< 8

7.2.3 Accelerator 1573

Urychlovací složka. Akcelerátor 1573 je homogenní disperze v kapalně epoxidové pryskyřici bez aglomerátů. Působí jako urychlovač. Zobrazuje přesný a konzistentní obsah dikyandiamidu. Snadná manipulace a míchání s epoxidovou pryskyřicí.

Skladování: na suchém větraném místě v původním uzavřeném obalu při teplotě 8 až 40°C, složka nesmí být vystavena přímému slunečnímu záření, působení tepla a vlhkosti. Za těchto podmínek skladování je skladovatelnost 3 roky. Parametry složky Accelerator 1573 jsou v Tab. 10. [16]

Tab. 10 Parametry složky Accelerator 1573 [16]

Accelerator 1573	
parametr	hodnota
viskozita při 25°C (ISO 2719)	60.000 - 90.000 mPa.s
hustota při 25°C (ISO 1675)	1,08 g/cm ³
skladovací teplota	< 8

7.2.4 Hardener XB 3471

Polyamidové tvrdidlo pro průmyslové kompozity s vysokou teplotou skelného přechodu a dlouhou trvanlivostí. Průhledná kapalina.

Skladování: na suchém větraném místě v původním uzavřeném obalu při teplotě 2 až 40°C, složka nesmí být vystavena přímému slunečnímu záření, působení tepla a vlhkosti. Za těchto podmínek skladování je skladovatelnost 2 roky. Parametry složky Hardener XB 3471 jsou v tab. 11. [16]

Tab. 11 Parametry složky Hardener 3471[16]

Hardener XB 3471	
parametr	hodnota
bod vzplanutí (ISO 2719)	> 100°C
hustota při 25°C (ISO 1675)	1,0 g/cm ³
skladovací teplota	2 - 40°C

7.3 Polymerní matrice Eporezit Epovill A/T-111

Pro volbu polymerní matrice byl zvolen epoxidový systém Eporezit Epovill A/T-111, který nabízí pro zpracování technologií prepreg firma Havel Composites. Důležitým faktorem výběru byla jeho dostupnost a vlastnosti. V tab. 12 jsou zobrazeny doby zpracovatelnosti pro různé teploty a doporučený poměr jednotlivých složek.

Tab. 12 Parametry aplikace Eporezit Epovill A/T-111[25]

EPOREZIT EPOVILL A/T-111	
Doba zpracovatelnosti pro 100 gramů pryskyřice	
teplota °C	čas minuta
23°C	nevytvzuje
80°C	120 min.
100°C	40 min.
130°C	20 min.
160°C	10 min.
Mísící poměr jednotlivých složek	
složka A	složka B
100	74

Vytvrzení aplikace Eporezit Epovill probíhá při vysoké teplotě, systém má střední viskozitu a optimální vlastnosti pro elektrické odlitky a laminát. Pryskyřice může mít oranžově-červený nádech, vytvrzuje pouze nad 80°C do teploty 160°C, která určuje tepelnou odolnost systému (není vytvrzován při pokojové teplotě). Je důležité pracovat se složkami při konstantní teplotě a nízké vlhkosti vzduchu. Při nízké teplotě skladování pryskyřice může dojít ke krystalizaci, před použitím tohoto výrobku je potřeba mírně ohřátí na 50°C. Hlavní aplikací systému jsou energetika (transformátory, výkonové tranzistory), telekomunikační průmysl, kondenzátory a jiné formy. [25]

7.3.1 EPOREZIT EPOVILL-A

Je speciální epoxidový vytvrzovací přípravek při vysokých teplotách, určený pro výrobu prepregů, pro aplikace litím nebo pro laminace. Aplikace EPOREZIT EPOVILL A je modifikovaná epoxidová pryskyřice (složka „A“ systému). Jedná se o dvousložkový systém a používá se pouze ve spojení s tužidlem EPOVILL T-111. Parametry Eporezit Epovill A jsou znázorněny v tab. 13. Technický list je součástí přílohy P 3. [25]

Tab. 13 Parametry aplikace Eporezit Epovill A [25]

EPOREZIT EPOVILL A	
parametr	hodnota
epoxidová ekvivalentní hmotnost	200 - 210 g/ekv.
epoxidová hodnota	0,47 - 0,5 ekv./100 g
viskozita při 25°C	4.500 – 6.000 mPa.s
hustota	1,157 - 1,159 g/cm ³

7.3.2 EPOREZIT T-111

Je tužidlo (složka "B") pro dvousložkové systémy na výrobu prepregů - lze využít jak pro lití, tak laminaci. Parametry složky jsou znázorněny v tab. 14. [25]

Tab. 14 Parametry aplikace Eporezit T-111 [25]

EPOREZIT T-111	
parametr	hodnota
index lomu při 25°C	1,4771 - 1,4795
hustota	1,151 - 1,156 g/cm ³

7.4 Separátory forem

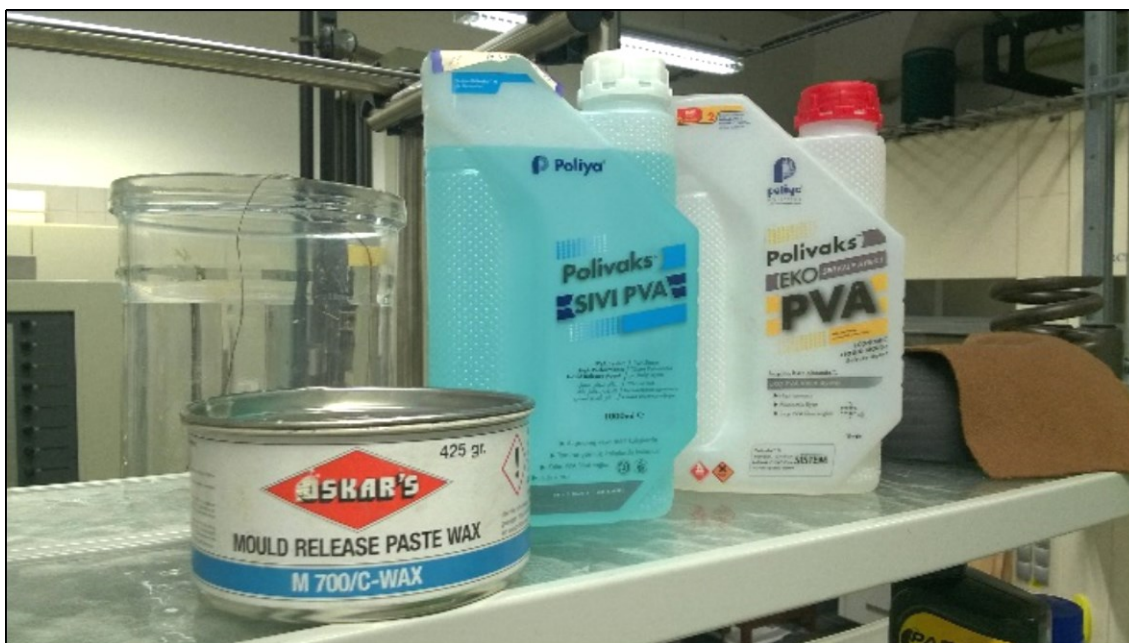
Při výrobě vzorků se musí na lisovanou formu použít separátor, který zabraňuje spojení lisovací formy a vzorku. Separátor se používá samostatně nebo ve spojení se separačním voskem. Na obr. 29 jsou zobrazeny některé druhy separátorů. [25]

- **Separátor PVA**

Nejspolehlivější separátor, osvědčený a vyzkoušený v mnoha aplikacích. Vhodný téměř pro všechny aplikace. Doporučuje se kombinovat se separačním základovým voskem pro znásobení spolehlivosti. Nanáší se houbičkou, štětcem nebo pistolí u stříkací verze. K dispozici v různých barevných kombinacích. Technický list je součástí přílohy P 4.

- **Separční vosk Oskar's M700/C WAX**

Velmi kvalitní a osvědčený separátor na bázi vosku.



Obr. 29 Separátor PVA a separční vosk Oskar's M700/C WAX

- **Frekote 770-NC**

Tento separátor je univerzální separační prostředek s vysokým skluzem vhodný pro formy s problémovou, složitou geometrií a pro vyšší teplotní odolnost. Rychle tvrdne za pokojové teploty a vytváří lesklý povrch na výliscích. Nanáší se na čistý povrch formy nástřikem, štětcem nebo potřením bavlněným hadříkem. Aplikují se až 4 vrstvy, jednotlivé vrstvy se nechají 5-10 minut zasychat. Technický list je součástí přílohy P 5.

Frekote 770-NC je čirá kapalina s doporučenou teplotou pro zpracování 15-60 °C. Doba tvrdnutí při pokojové teplotě 5-10 minut, teplotní odolnost až 400 °C. Dodavatel Havel Composites CZ s.r.o. [25]

7.5 Stroje a zařízení

Při výrobě vzorků byl použit vyhřívaný lis a tahové zkoušky vzorků byly provedeny na speciálním zkušebním zařízení.

7.5.1 Vyhřívaný lis MITAS

Pro výrobu kompozitu z prepregu byl použit laboratorní vyhřívaný lis od firmy MITAS, a.s. Zlín (obr. 30). Lis obsahuje elektricky vyhřívané desky a hydraulický zvedák k vytvoření lisovacího tlaku. Technické údaje zařízení jsou zobrazeny v Tab. 15.

Tab. 15 Technické parametry vyhřívaného lisu MITAS

VYHŘÍVANÝ LIS MITAS	
Technické parametry	
rozměr desek	250 x 250 mm
příkon	2400W
maximální teplota	200°C
svírací síla	5 tun



Obr. 30 Vyhřívaný lis MITAS

7.5.2 Zkušební zařízení ZWICK 1456

Tahové zkoušky zkušebních vzorků byly provedeny na univerzálním zkušebním stroji ZWICK 1456 (obr. 31). Jedná se o zařízení na statické a dynamické testování polymerních a kompozitních materiálů. Zařízení je složeno z pevného rámu, pohyblivého příčnicku se šroubovicí, elektromotoru s převodovkou, upínacího zařízení a snímače. Zařízení je propojeno s počítačem, který zaznamenává získaná data měření v programu TestExpert II. Program zaznamená a vyhodnotí základní statistické údaje a průběhy zkoušek v křivkách. Technické parametry zařízení jsou zobrazeny v tab. 16.

Tab. 16 Technické parametry zkušebního stroje ZWICK 1456

ZKUŠEBNÍ ZAŘÍZENÍ ZWICK 1456	
Technické parametry	
maximální posun v příčnicku	800 mm.min ⁻¹
šířka pracovního prostoru	420 mm
celková výška	2012 mm
celková šířka	630 mm
snímače síly	2,5 a 20 kN
maximální zkušební síla	20 kN
teplotní rozsah zkoušek	-70 až 290°C
celková hmotnost	150 kg



Obr. 31 Zkušební zařízení ZWICK 1456

8 VÝROBA ZKUŠEBNÍCH VZORKŮ

Výroba zkušebních vzorků představovala nastřihání skelné tkaniny, prosycení tkaniny pryskyřicí a následně vytvrzení v lisovacím stroji za působení teploty a tlaku. Postupně bylo vyrobeno několik sérií vzorků prepregů Araldite LY 1556 od firmy Hunstman a série vzorků Eporezit Epovill od firmy Havel Composites. Vytvrzení vzorků probíhalo v lisovacím stroji, kde byla u každého vzorku nastavena jiná teplota a čas ohřevu, dle doporučení výrobce. V závěru proběhla tahová zkouška na zjištění nejlepších parametrů kompozitu vzhledem k teplotě, času a způsobu výroby prepregu. Celkem bylo vyrobeno 360 kusů vzorků, které byly následně otestovány na zkušebním zařízení.

Postup výroby prepregu, následného vytvrzení kompozitu a přípravy zkušebních vzorků:

1. návrh výroby prepregu, volba materiálu a počtu zkušebních vzorků,
2. příprava skelné tkaniny,
3. odvážení přesného množství složek kompozitu a promíchání složek,
4. úprava formy separátorem,
5. prosycení tkaniny pryskyřicí – výroba prepregu,
6. uložení vrstev prepregu do formy dle návrhu výroby vzorků,
7. vytvrzení v lisovacím stroji za působení teploty a tlaku (rozdílné teploty a časy),
8. vyjmutí kompozitu z formy,
9. příprava plošného vzorku kompozitu,
10. nastřihání potřebných rozměrů jednotlivých zkušebních vzorků.

Pracovní pomůcky a nářadí:

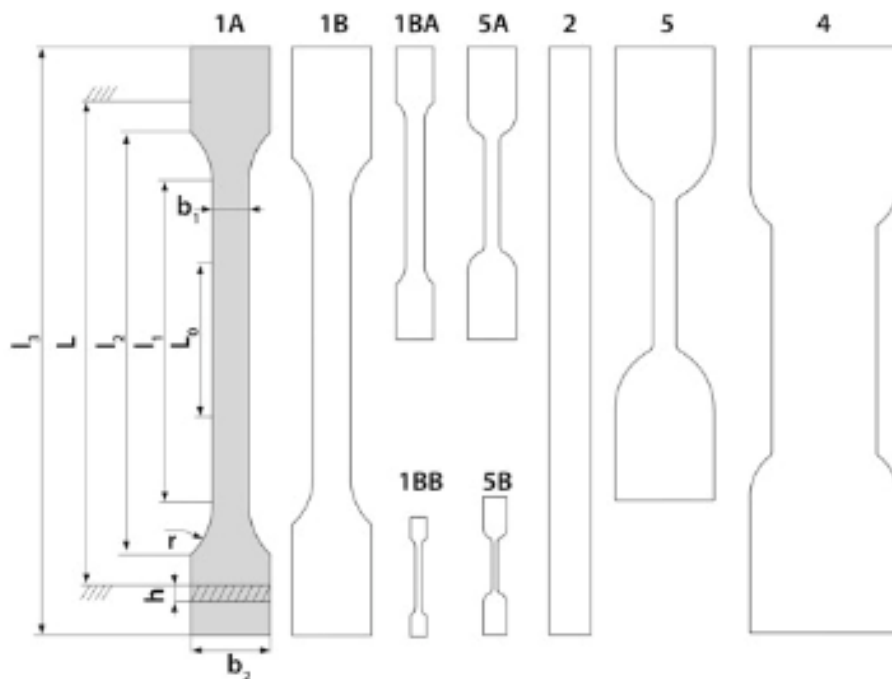
- pravítko, svinovací metr, tužka, fix, nůžky, odlamovací nůž,
- digitální laboratorní váha, infračervený měřič teploty,
- plastová stěrka, špachtle, štětec, plastové nádoby,
- univerzální pákové nůžky na plech,
- digitální posuvné měřítko.

Ochranné pracovní pomůcky:

- pracovní plášť, silikonové rukavice, pracovní kožené rukavice, ochranné brýle.

Výroba zkušebních vzorků byla provedena v laboratoři ÚVI FT UTB ve Zlíně.

Tvary a rozměry zkušebních těles jsou přesně definovány normou pro daný materiál. Norma ČSN EN ISO 527-4 je pro: Plasty – Stanovení tahových vlastností – Část 4: Zkušební podmínky pro izotropní a orthotropní plastové kompozity vyztužené vlákny. Na Obr. 32 jsou znázorněny různé tvary zkušebních těles. Pro naše potřeby jsme zvolili typ zkušebního vzorku č. 2 a rozměry 150 x 15 mm.



Obr. 32 Různé tvary zkušebních těles dle normy

8.1 Návrh výroby zkušebních vzorků

Výběr materiálů a způsobů výroby patřil k základním a hlavním úkolům práce a vycházel ze základního zadání diplomové práce, to je posouzení vlastností matric vhodných pro prepreg výrobní systémy. Zvolili jsme dvě polymerní aplikace z nabídky složek společnosti Huntsman a společnosti Havel Composites, určených pro výrobu prepreg systémů. Před samotnou výrobou byly navrženy způsoby výroby, zvolena výztuž, počet vrstev výztuže, množství a poměry složek matrice, teploty a časy vytvrzení dle doporučení výrobců pryskyřice a také označení zkušebních vzorků. V Tab. 17 je návrh výroby složky Araldite LY 1556, kde jsme zvolili tři poměry složek – systém 1 až 3, rozdílné teploty vytvrzení a časy vytvrzení. V Tab. 18 je návrh výroby složky Eporezit Epovill, kde jsme vybrali jeden poměr složek a podobné teploty a časy vytvrzení, pro posouzení

vlastností kompozitu. Pro obě složky byl navržen stejný počet vrstev skelné tkaniny Aeroglas 200.

Tab. 17 Návrh zpracování a označení vzorků Araldite LY 1556

ARALDITE LY1556				
složky		system 1	system 2	system 3
		hmotnostní díly složek		
Araldite LY1556		100	100	100
Aradur 1571		23	23	23
Accelerator 1573		3	5	7
Hardener XB 3471		14	14	14
Zpracování dle poměru složek		system 1		
teplota pro vytvrzení	čas potřebný k vytvrzení	označení vzorku		
		počet vrstev tkaniny		
		2 vrstvy	4 vrstvy	6 vrstev
110°C	18-22 min.	CH1-2-I.	CH1-4-I.	CH1-6-I.
120°C	8-12 min.	CH1-2-II.	CH1-4-II.	CH1-6-II.
130°C	4-6 min.	CH1-2-III.	CH1-4-III.	CH1-6-III.
Zpracování dle poměru složek		system 2		
teplota pro vytvrzení	čas potřebný k vytvrzení	označení vzorku		
		počet vrstev tkaniny		
		2 vrstvy	4 vrstvy	6 vrstev
110°C	13-17 min.	CH2-2-I.	CH2-4-I.	CH2-6-I.
120°C	6-10 min.	CH2-2-II.	CH2-4-II.	CH2-6-II.
130°C	2-5 min.	CH2-2-III.	CH2-4-III.	CH2-6-III.
Zpracování dle poměru složek		system 3		
teplota pro vytvrzení	čas potřebný k vytvrzení	označení vzorku		
		počet vrstev tkaniny		
		2 vrstvy	4 vrstvy	6 vrstev
110°C	11-15 min.	CH3-2-I.	CH3-4-I.	CH3-6-I.
120°C	5-9 min.	CH3-2-II.	CH3-4-II.	CH3-6-II.
130°C	2-5 min.	CH3-2-III.	CH3-4-III.	CH3-6-III.

Tab. 18 Návrh zpracování a označení vzorků Eporezit Epovill

EPOREZIT EPOVILL-A				
složky		hmotnostní díly složek		
Eporezit Epovill - A		1000		
Eporezit T-111		735		

Zpracování dle poměru složek		EPOREZIT		
teplota pro vytvrzení	čas potřebný k vytvrzení	označení vzorku		
		počet vrstev tkaniny		
		2 vrstvy	4 vrstvy	6 vrstev
100°C	40 min.	HM-2-I.	HM-4-I.	HM-6-I.
130°C	20 min.	HM-2-II.	HM-4-II.	HM-6-II.
160°C	10 min.	HM-2-III.	HM-4-III.	HM-6-III.

8.1.1 Výpočet množství potřebné pryskyřice vzhledem v vrstvám kompozitu.

Pro výpočet poměrového množství jednotlivých složek polymerní matrice bylo použito vzorce pro výpočet hmotnostního poměru, který je definován vzorcem (5). Na výrobu zkušebních vzorků byla použita skelná tkanina Aeroglass 200, která má hmotnost 198 g/m^2 . Rozměr skelné tkaniny na jednu vrstvu $160 \times 160 \text{ mm}$. Počet vrstev dané série (systému) 36 kusů byl odvozen z tab. 17 a tab. 18. Postup výpočtu:

- skelná tkanina Aeroglass 200 = 198 g/m^2 ,
- velikost zkušebního vzorku (kompozitu) = $0,16 \times 0,16 \text{ m} = 0,0256 \text{ m}^2$,
- počet vrstev daného systému = 36 vrstev,
- hmotnost látky m_v pro navrženou sérii se vypočítala následovně:

$$36 \cdot 0,0256 = 0,9216 \text{ m}^2 \cdot 198 = 182,5 \text{ g}$$

- hmotnostní poměr w_a :

$$w_a = \frac{m_v}{m_s} \cdot 100 \quad [\%] \quad (5)$$

$$w_a = \frac{182,5}{100+23+3+14} \cdot 100 = 130,3 \%$$

Kde: w_a – hmotnostní poměr,

m_v – hmotnost vyztužující tkaniny,

m_s - součet hmotnostních poměrů jednotlivých složek.

- k jednotlivým složkám matrice se připočítalo 10 % na odpad při výrobě a proscování výztuže,
- pro výpočet všech objemových složek zkušebních matric dle hmotnostního poměru w_a slouží tab. 19.

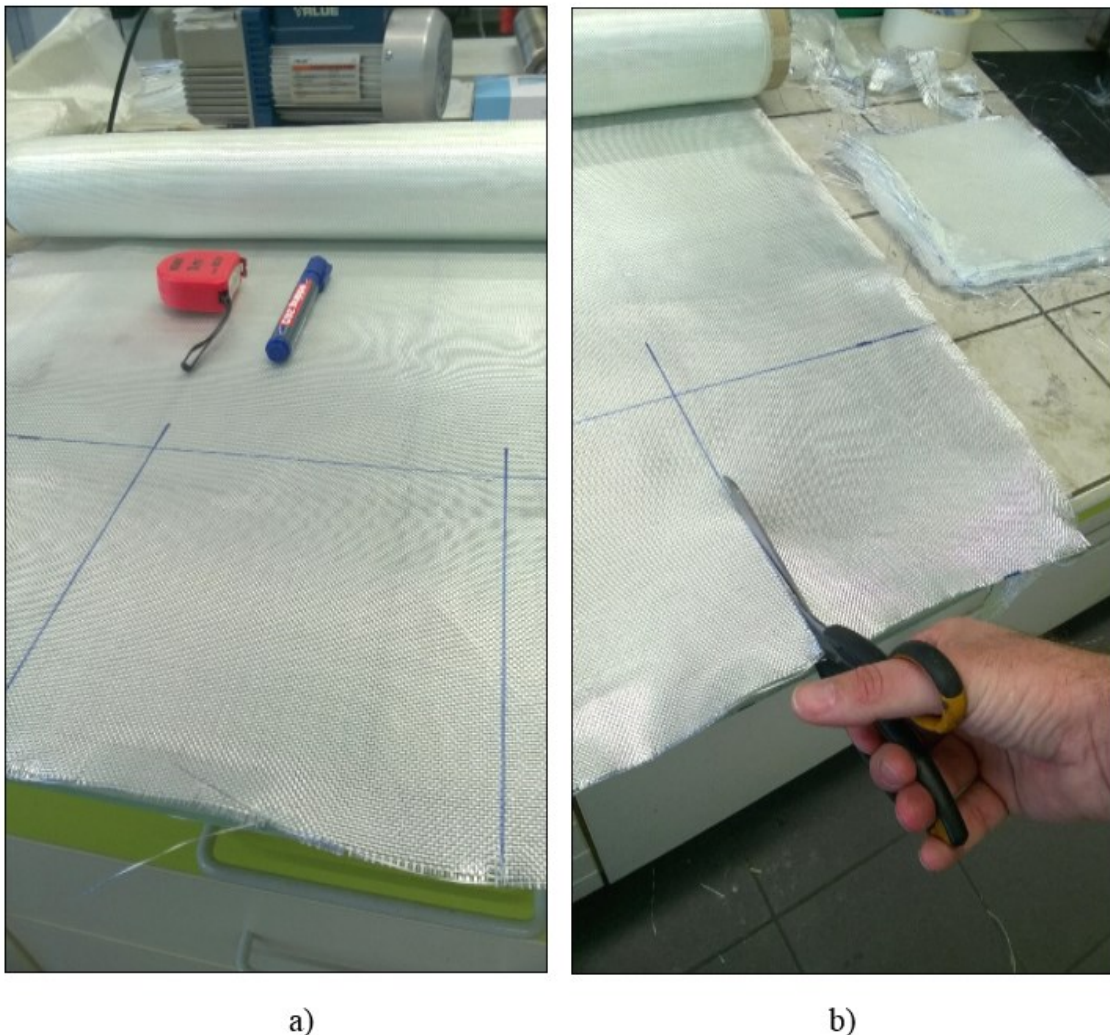
Tab. 19 Výpočet poměrových složek matrice dle hmotnostního poměru w_a

Složka Araldite LY 1556							
složky		systém 1		systém 2		systém 3	
		hmotnostní díly složek (dle výrobce)					
Araldite LY 1556		100		100		100	
Aradur 1571		23		23		23	
Accelerator 1573		3		5		7	
Hardenner XB 3471		14		14		14	
Složka Eporezit Epovill							
složky		hmotnostní díly složek (dle výrobce)					
Eporezit Epovill A		1000					
Eporezit T-111		735					
Hmotnost skelné tkaniny m_v Aeroglass 200							
skelná tkanina g/m ²	velikost zkušebního vzorku mm	velikost zkušebního vzorku m ²	počet vrstev zkušební série	celková hmotnost tkaniny m_v g			
198	160 x 160	0,0256	36	182,5			
Množství pryskyřice dle hmotnostního poměru w_a složky Araldite							
složky		systém 1		systém 2		systém 3	
		hmotnostní díly složek					
hmotnostní poměr w_a	%	130		129		127	
připočet na odpad	%	m	m + 10 %	m	m + 10 %	m	m + 10 %
Araldite LY 1556		130	143	129	141	127	139
Aradur 1571		30	33	30	33	29	32
Accelerator 1573		4	4	6	7	9	10
Hardenner XB 3471		18	20	18	20	18	20
Kontrolní součet		182,5	200,7	182,5	200,7	182,5	200,7
Množství pryskyřice dle hmotnostního poměru w_a složky Eporezit Epovill							
složky		hmotnostní díly složek					
hmotnostní poměr w_a	%	11					
připočet na odpad	%	m		m + 10 %			
Eporezit Epovill A		105		116			
Eporezit T-111		77		85			
Kontrolní součet		182,5		200,7			

8.2 Výroba zkušebních vzorků

8.2.1 Výztuž

Příprava navržené skelné výztuže Aeroglass 200 pro vzorky představovala vyměření a následné nastříhání skelné tkaniny na požadovaný rozměr o velikosti 160 x 160 mm. Stříhání vzorků bylo provedeno ručními nůžkami a vyrobilo se celkem 144 kusů pláten (36 kusů na čtyři série). Na Obr. 33 je zobrazeno rozměření skelného plána a následné stříhání požadovaného rozměru. Obr. 34 ukazuje nastříhané skelné vlákna připravené pro výrobu kompozitního materiálu.



Obr. 33 Příprava skelné tkaniny AEROGLOSS 200: a) rozměření zkušebního vzorku, b) stříhání tkaniny



Obr. 34 Skelná tkanina AEROGLOSS 200 připravená pro zkušební vzorky

8.2.2 Matrice

Příprava matrice patřila k důležitému kroku výroby zkušebních vzorků. Základem výroby bylo důkladné nastudování technických listů každého polymerního systému a přesné odvážení jednotlivých složek aplikace. Na digitální laboratorní váze byly odváženy jednotlivé složky dané matrice dle předem spočítaných poměrových hodnot. V tab. 20 jsou provedeny potřebné výpočty množství jednotlivých složek vzhledem k hmotnostnímu poměru dané matrice. Poměry jednotlivých složek byly odečteny dle technických listů výrobce. Na obr. 35 jsou zobrazeny naměřené jednotlivé složky aplikace Araldite. V technickém listu výrobce je také uvedeno možné předmíchání některých složek a také doby zpracovatelnosti matrice, která je řádově několik týdnů při dodržení podmínek skladování. Z vlastních poznatků můžeme říci, že namíchaná matrice byla při pokojové teplotě cca za týden zcela ztuhlá.

Složky byly důkladně promíchány a pomocí plastové stěrky a štětce se postupně prosycovala připravená skelná vlákna. Přebytečné množství matrice bylo stěrkou odebráno z tkaniny a vznikl prepreg systém. Na obr. 36 je znázorněno prosycování skelné tkaniny pryskyřicí a již vyrobená prosycená tkanina – prepreg.



Obr. 35 Příprava polymerní matrice – odměření složek pryskyřice



a)



b)

Obr. 36 Prosyčení skelných vláken polymerní matricí: a) prosycování vlákna pryskyřicí, b) prosycená tkanina - prepreg

8.2.3 Příprava formy

Výroba konečného kompozitního materiálu z prepregu byla provedena pomocí lisovacích ocelových forem a vyhřívaného lisu. Před samotným lisováním kompozitního vzorku se musela připravit forma, na kterou se nanasla vrstva separátoru. Tento proces je velice důležitý, protože separátor formy zamezuje spojení, přilepení materiálu do formy. Tento krok byl také zdrojem velkých problémů při výrobě vzorku, kdy použitý univerzální separátor PVA společně se separačním voskem Oskar's se ukázaly jako zcela nevhodné a došlo k slepení formy a vzorku. Při následném použití separátoru Frekote, který je vhodný pro vyšší teploty, probíhalo lisování zcela bez problémů. Důležité bylo dodržet přesně výrobní postup implantace separátoru Frekote dle návodu výrobce, který obnášel zejména nanesení několika vrstev separátoru (3 až 5 vrstev) jemným hadříkem s časovým odstupem 5 až 10 minut. Na obr. 38 je znázorněna úprava povrchu formy separátorem Frekote. Pro výrobu vzorku byly vyrobeny tři sady forem, což mělo dobrý dopad na časovost výroby vzorků vzhledem k dlouhým intervalům přípravy formy separátorem. Na obr. 37 jsou zobrazeny sady lisovacích forem.



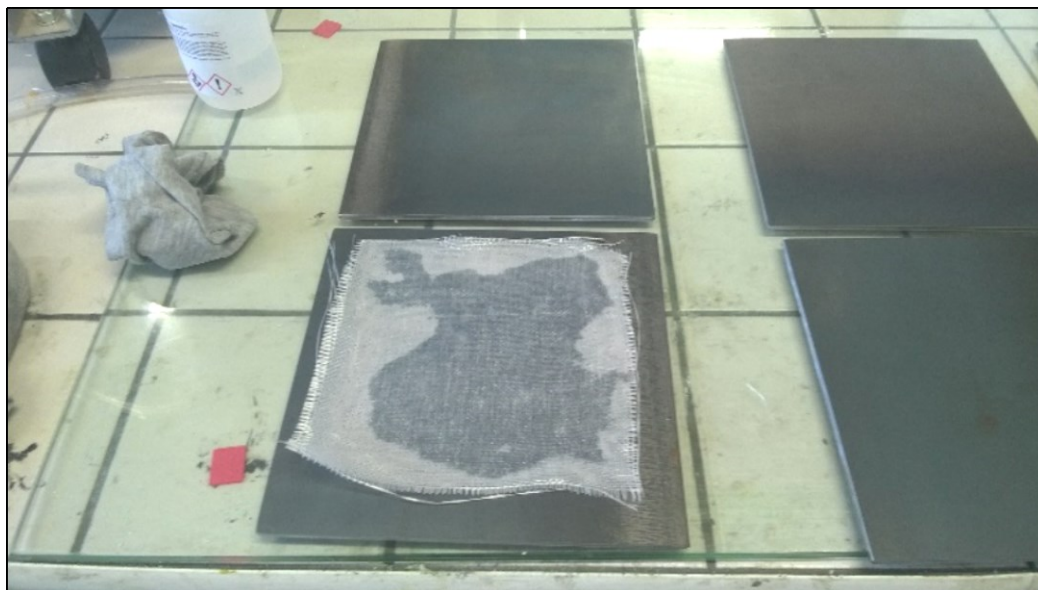
Obr. 37 Připravené formy pro lisování zkušebních vzorků



Obr. 38 Úprava povrchu formy separátorem Frekote

8.2.4 Vrstvení prepregů do formy

Na upravenou formu se postupně kladly jednotlivé prosycené vrstvy prepregu, které se vždy pevně přitlačily plastovou stěrkou, aby se mezi jednotlivými vrstvami netvořily vzduchové mezery a nevznikala delaminace vrstev. Při pokládání jednotlivých vrstev na formu byl kladen důraz na přesné uložení vrstev prepregu. U prepregu prosyceného ruční metodou není zaručena přesná vrstva pryskyřice a může dojít k místům s více nebo méně prosycením, což má vliv na konečné mechanické vlastnosti kompozitu. Na obr. 39 je znázorněno pokládání vrstev prepregu na formu. Obr. 40 Prepreg s šesti vrstvami skelné tkaniny.



Obr. 39 Pokládání vrstev prepregu



*Obr. 40 Prepreg s šesti vrstvami skelné tkaniny
před uložením do formy*

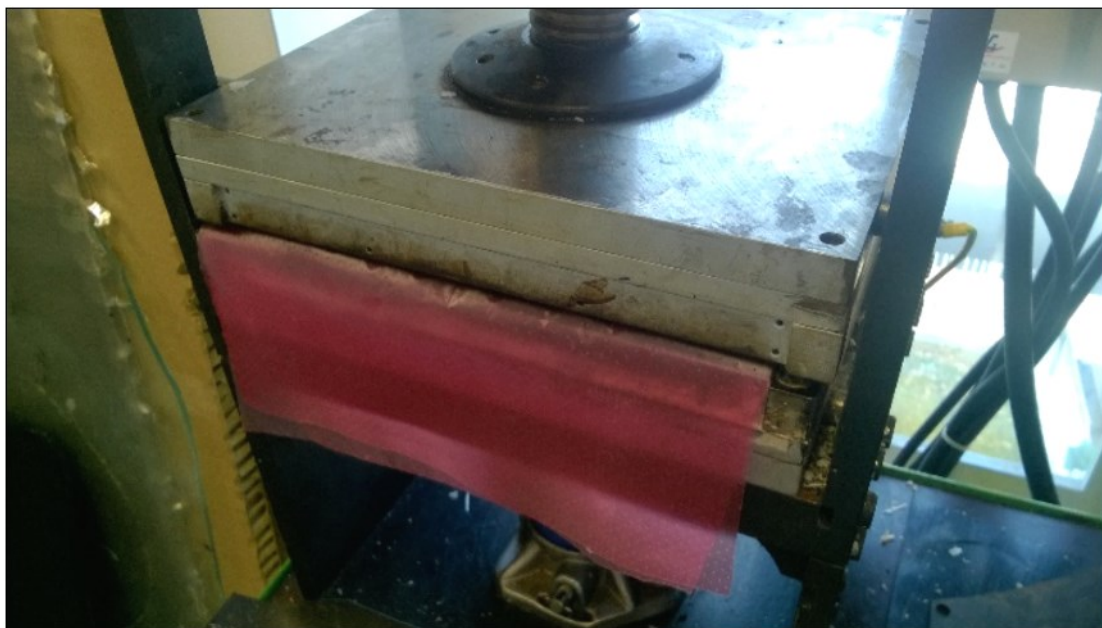
8.2.5 Vytvrzení

Pro výrobu kompozitu z prepregu byl použit laboratorní vyhřívaný lis od firmy MITAS, a.s. Zlín. Dle návrhu výroby zkušebních vzorků byla nastavena teplota vyhřívaných čelistí na požadovanou hodnotu. Pro ověření teploty čelistí byl použit infračervený měřič teploty, na základě tohoto měření jsme zvýšily nastavenou teplotu dle teploty na vyhřívaných deskách. Při lisování prvních vzorků jsme zaznamenali vytékání přebytečné pryskyřice z formy mezi vyhřáté desky, což nám způsobilo znečištění desek lisu. K zamezení tohoto stavu bylo použito ochranné folie s vyšší teplotní odolností, která se vložila mezi vyhřívané desky a ocelovou formu, zobrazeno na obr. 41. Na obr. 42 je zobrazeno uzavření formy a vytvrzení matrice.

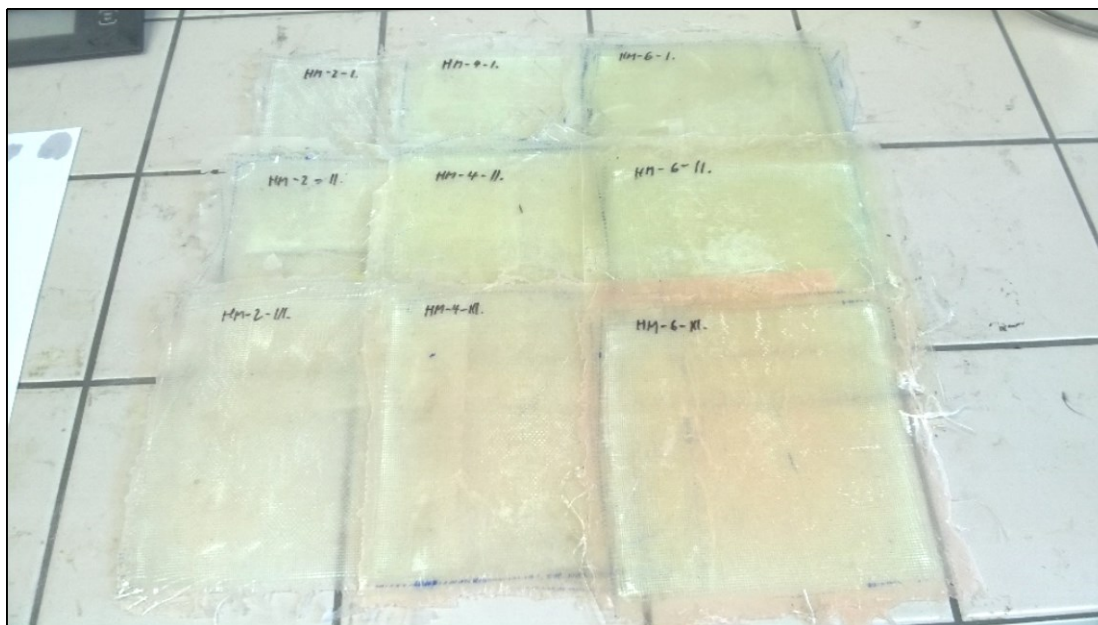
Po nastaveném čase vytvrzení se forma za pomoci pracovních kožených rukavic vyndala z lisu a pomocí ocelové špachtle se vyndal zkušební vzorek. Následně se hotový kompozitní vzorek zatížil ocelovou deskou do úplného vychladnutí. Na obr. 43 jsou znázorněny hotové kompozitní vzorky složky Eporezit Epovill.



Obr. 41 Vložení formy do lisu



Obr. 42 Uzavření formy a vytvrzení matrice zkušebního vzorku



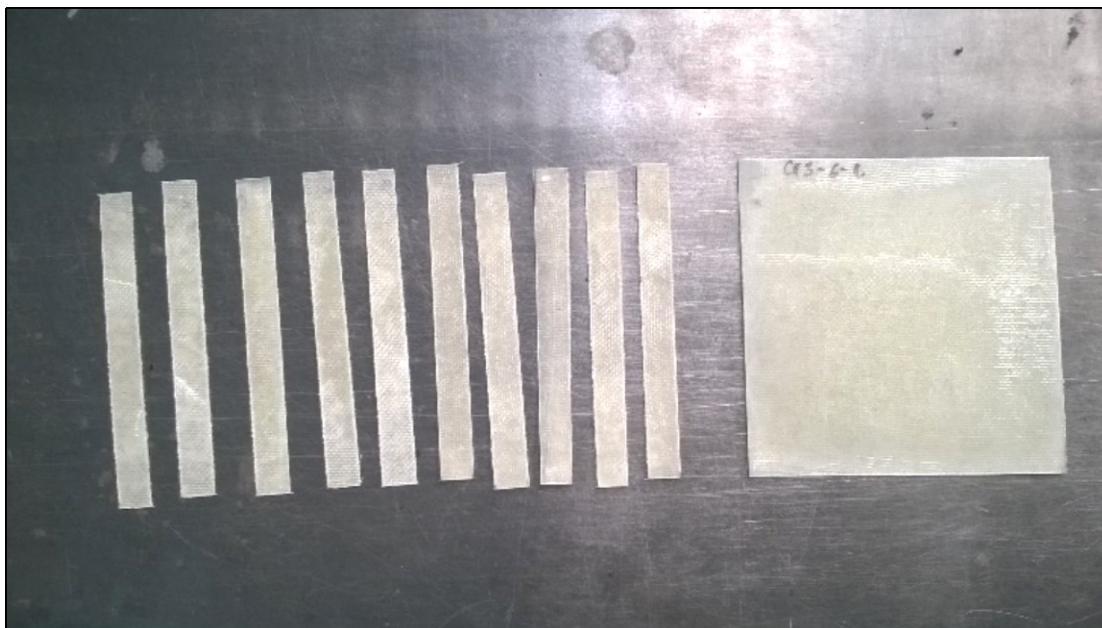
Obr. 43 Hotové kompozitní vzorky složky Eporezit Epovill

8.2.6 Úprava vzorků kompozitu pro tahovou zkoušku

Vyrobené zkušební vzorky byly rozměřeny a následně zkráceny na univerzálních pákových nůžkách na plech. Na obr. 44 je znázorněna úprava zkušebních vzorků na požadovaný rozměr. Nejprve se výlisek upravil na rozměr 150 x 150 mm a poté bylo vyrobeno z každého kompozitního dílu 10 zkušebních vzorků šířky 15 mm. Na obr. 45 jsou zkušební vzorky upravené pro tahovou zkoušku. Vzorky byly uloženy do označených sáčků a připraveny pro zkoušky mechanických vlastností.



Obr. 44 Úprava zkušebních vzorků na požadovaný rozměr



Obr. 45 Zkušební vzorky upravené pro tahovou zkoušku

8.3 Vady a zmetky při výrobě

Při výrobě zkušebních vzorků nastalo několik zásadních problémů, které se musely bezprostředně vyřešit. Mezi zásadní problémy patřilo:

- při lisování vzorků v lisu docházelo k zapečení formy s kompozitní složkou,
- vytékání přebytečné pryskyřice mezi těleso lisu a formy a následné spečení,
- nevytvrzený kompozitní vzorek.

Příčiny a způsoby řešení:

Před lisováním se musí forma upravit separátorem, aby se zabránilo spojení formy a materiálu. Pro úpravu formy byl použit běžně používaný univerzální separátor PVA v kombinaci se separačním voskem Oscar's. Tento prostředek se neosvědčil z důvodu vyšší teploty vytvrzování. V technickém listu separátoru PVA je uvedeno použití pro vyšší teploty, ale jsou zde uvedeny teploty do 110°C. Teploty vytvrzení námi navržených vzorků jsou od 100 do 160°C. Zvolili jsme nový separátor Frekote na bázi silikonu, který je určen pro teploty do 400°C. Tento separátor se osvědčil a složky se daly snadno vyjmout z formy.

Vytékání přebytečné pryskyřice mezi těleso lisu a formy a následné spečení vznikalo z důsledku přebytečného množství matrice. Při ručním proscování tkaniny není nanášeno rovnoměrné množství pryskyřice a při více vrstvách docházelo k mírnému vytékání pryskyřice a slepení formy. K zamezení vytékání matrice bylo použito ochranné folie s vyšší teplotní odolností, která se vložila mezi vyhřívané desky a ocelovou formu.

Nevytvrzený kompozitní vzorek vznikl z důvodu nízké teploty lisovací formy. Použili jsme infračervený měřič teploty pro měření lisovacích desek a formy. Následně byla zjištěna rozdílná teplota na displeji lisovacího stroje a lisovacích deskách. Byla upravena hodnota na lisovacím stroji dle měřiče tepla a při uzavření formy byla stanovena doba ustálení teploty na cca 3 minuty a poté se začalo s měřením času.

Na obr. 46 jsou vidět vadné zkušební vzorky z důvodu slepení formy nebo nedostatečné teploty vytvrzování.



Obr. 46 Vadné polymerní vzorky – z důvodu slepení formy a nedostatečné teploty vytvrzování

9 ZKOUŠKY VZORKŮ

Testování zkušebních vzorků bylo provedeno v laboratoři ÚVI FT UTB ve Zlíně na univerzálním zkušebním stroji ZWICK 1456 při konstantní teplotě 22 °C. Účelem mechanických zkoušek materiálů bylo posouzení chování materiálů při působení vnějších sil. Pro účely posouzení nejvhodnější matrice kompozitního materiálu byla zvolena statická tahová zkouška dle normy ČSN EN ISO 527-4. Celkem bylo provedeno přes 360 měření zkušebních vzorků.

9.1 Tahová zkouška

Tahová zkouška se provádí na trhacím stroji, to je zařízení umožňující provádět deformaci vzorku různými deformačními mechanizmy až po jeho destrukci. Při tahové zkoušce je vzorek podroben tahové deformaci, jejíž velikost s časem rovnoměrně roste. Sleduje se závislost tahového napětí σ na deformaci ϵ . U testovaných vzorku vyhodnocujeme modul pružnosti E [MPa], mez pevnosti v tahu σ_m [MPa], poměrnou deformaci – prodloužení při mezi pevnosti ϵ [%] a vykonaná deformační práci k maximální síle W [N.mm]. Tahová zkouška probíhala dle normy ČSN EN ISO 527-4 a výsledkem zkoušek jsou tahové křivky napětí - deformace.

9.1.1 Nastavení zkušebního zařízení

Zkušební zařízení se nejdříve připravilo pro tahovou zkoušku, což představovalo montáž upínacích čelistí a snímače měření. Následně se nastavily v počítači hodnoty průběhu zkoušek jako vzdálenosti čelistí, síla pro zatížení a rychlostní průběhy zkoušek. Zkušební vzorky byly postupně změřeny, hodnoty zaznamenány do programu a vkládány do speciálního pneumatického upínacího zařízení. Následně probíhala tahová zkoušky, kde se za pomoci snímače přenášely získané data měření do stolního počítače. Po úplné destrukci nebo přetržení vzorků se proces opakoval. V tab. 20 jsou uvedené nastavené hodnoty měření a na obr. 47 je zobrazen průběh zkoušky uchycení a porušení zkušebního vzorku.

Tab. 20 Nastavené hodnoty měření stroje ZWICK 1456

Nastavené hodnoty měření na zkušebním zařízení ZWICK 1456	
Nastavené hodnoty	
rychlost zatížení	5 mm.min ⁻¹
zatížení před	5 N
rychlost před zatížení	5 mm.min ⁻¹
rychlost při měření modulu pružnosti	10 mm.min ⁻¹
vzdálenost čelistí	60 mm



a)



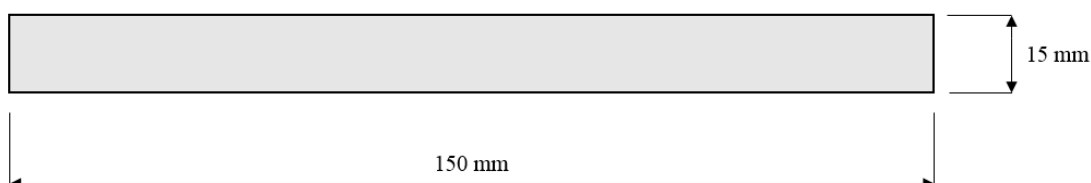
b)

Obr. 47 Zkouška tahem: a) uchycení vzorku do čelisti stroje,
b) porušení zkušebního vzorku

9.1.2 Zkušební vzorky

Pro tahovou zkoušku byla připravena zkušební tělesa o těchto rozměrech (obr. 48):

- délka zkušebního tělesa 150 mm
- šířka zkušebního tělesa 15 mm
- tloušťka zkušebního tělesa 0,45 – 1,2 mm (dle vrstev tkaniny)



Obr. 48 Rozměry zkušební vzorku

Šířka a tloušťka každého zkušebního tělesa byla před každým testováním změřena digitálním posuvným měřidlem a byla zaznamenána do počítače zkušebního zařízení. V příloze P 6 diplomové práce jsou výsledky všech naměřených hodnot rozměrů zkušebních vzorků, které se mírně liší v důsledku výrobních nepřesností.

9.2 Statistická nejistota měření

Zaznamenané naměřené hodnoty jednotlivých zkušebních sérií se vyhodnocovaly pomocí statistických metod měření. Počítal se aritmetický průměr naměřených hodnot \bar{x} , směrodatná odchylka s a variační koeficient v_k . Pro určení statistické nejistoty jsme použily směrodatnou odchylku s dle vztahu (6). Směrodatná odchylka s je kvadratický průměr odchylek hodnot od aritmetického průměru \bar{x} . Variační koeficient v_x (v_k) nám určuje rozdělení pravděpodobnosti náhodné veličiny – podíl směrodatné odchylky s a aritmetického průměru \bar{x} . Určuje procentuální variabilitu měření. Vypočítá se pomocí vztahu (7).

Směrodatná odchylka:

$$s = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2} \quad (6)$$

Variační koeficient:

$$v_x = \frac{s_x}{\bar{x}} \cdot 100 \quad [\%] \quad (7)$$

9.3 Naměřené hodnoty při tahové zkoušce

Tahové zkoušky byly zapsány v programu TestExpert II. Zaznamenaná data měření, základní statistické údaje a průběhy zkoušek v grafech byla převedena do aplikace Excel a následně použita pro hodnocení v diplomové práci.

Sledovány byly zejména parametry – tloušťka a šířka vzorku (měřeny posuvným digitálním měřidlem), modul pružnosti v tahu E [MPa], mez pevnosti v tahu σ_m [MPa], poměrná deformace dle meze pevnosti ε [%] a deformační práce W [N.mm]. Program následně vyhodnotil průměrné hodnoty \bar{x} měření dané série včetně směrodatné odchylky s a variačního koeficientu v_k .

V tab. 21, 22, 23 jsou zapsány průměrné hodnoty měření jednotlivých sérií zkušebních vzorků pro dvou, čtyř a šesti vrstvý kompozitní vzorek. Každá série představovala deset zkušebních těles, z kterých byly vyhodnoceny průměrné hodnoty měření. Jednotlivá data měření včetně grafů jsou součástí přílohy P 6 diplomové práce.

*Tab. 21 Průměrné naměřené hodnoty tahové zkoušky kompozitního materiálu
– 2 vrstvy skelné výztuže*

Kompozitní materiál - 2 vrstvy skelné výztuže												
označení vzorku	E - modul pružnosti			σ_m - mez pevnosti			ε -poměrná de- formace			W - deformační práce		
	MPa			MPa			%			N.mm		
	\bar{x}	s	v_k	\bar{x}	s	v_k	\bar{x}	s	v_k	\bar{x}	s	v_k
CH1-2-I.	11 960	728,6	6,09	235	15,9	6,76	2,0	0,1	6,62	488,02	71,34	14,62
CH1-2-II.	11 830	1 654,0	13,98	243	38,6	15,90	2,1	0,3	13,19	533,18	150,30	28,19
CH1-2-III.	13 160	2 015,0	15,32	265	32,8	12,37	2,2	0,2	8,11	639,01	125,70	19,67
CH2-2-I.	12 020	1 627,0	13,53	226	32,3	14,28	1,9	0,2	9,57	478,88	115,93	24,21
CH2-2-II.	13 290	834,6	6,28	275	24,8	8,99	2,2	0,3	13,20	678,05	152,43	22,48
CH2-2-III.	12 910	598,7	4,64	255	40,0	15,65	2,4	0,3	14,59	710,17	196,43	27,66
CH3-2-I.	14 310	2 216,0	15,49	260	36,7	14,12	2,0	0,3	13,21	584,05	148,22	25,38
CH3-2-II.	13 600	887,1	6,52	284	21,9	7,74	2,1	0,1	4,97	649,57	42,54	6,55
CH3-2-III.	14 360	1 028,0	7,16	262	43,9	16,79	2,0	0,3	16,51	572,76	169,12	29,53
HM-2-I.	12 060	294,5	2,44	239	37,1	15,54	2,3	0,5	20,96	627,12	242,76	38,71
HM-2-II.	11 730	2 284,0	19,47	232	48,4	20,90	2,1	0,5	25,40	551,87	281,23	50,96
HM-2-III.	12 200	545,3	4,47	282	26,6	9,42	2,3	0,3	11,42	694,82	130,09	18,72

Tab. 22 Průměrné naměřené hodnoty tahové zkoušky kompozitního materiálu
– 4 vrstvy skelné výztuže

Kompozitní materiál - 4 vrstvy skelné výztuže												
označení vzorku	E - modul pružnosti			σ_m - mez pevnosti			ε -poměrná deformace			W - deformační práce		
	MPa			MPa			%			N.mm		
	\bar{x}	s	v_k	\bar{x}	s	v_k	\bar{x}	s	v_k	\bar{x}	s	v_k
CH1-4-I.	12 710	1169,0	9,20	265	22,8	8,59	2,2	0,2	10,57	1 274,66	211,73	16,61
CH1-4-II.	13 400	468,9	3,50	275	18,9	6,87	2,3	0,2	10,06	1 382,39	248,16	17,95
CH1-4-III.	12 720	1302,0	10,23	271	14,7	5,43	2,2	0,2	6,85	1 283,50	169,58	13,21
CH2-4-I.	13 430	701,1	5,22	261	22,7	8,72	2,1	0,2	9,56	1 176,95	234,80	19,95
CH2-4-II.	13 490	1169,0	8,67	276	23,9	8,64	2,2	0,1	5,66	1 355,84	181,81	13,41
CH2-4-III.	12 980	825,5	6,36	269	20,4	7,57	2,3	0,2	6,92	1 348,14	204,88	15,20
CH3-4-I.	13 550	895,0	6,61	266	29,9	11,24	2,1	0,2	9,31	1 177,33	231,94	19,70
CH3-4-II.	13 540	1873,0	13,84	275	25,7	9,35	2,1	0,2	8,23	1 224,37	218,02	17,81
CH3-4-III.	11 320	1635,0	14,44	225	43,1	19,12	2,2	0,2	10,09	1 143,07	248,61	21,75
HM-4-I.	13 290	932,6	7,02	288	10,6	3,67	2,5	0,2	6,46	1 677,04	178,22	10,63
HM-4-II.	13 890	583,2	4,20	277	18,4	6,64	2,2	0,1	6,00	1 350,12	150,39	11,14
HM-4-III.	13 090	1509,0	11,53	261	43,6	16,66	2,1	0,4	16,98	1 227,22	410,45	33,45

Tab. 23 Průměrné naměřené hodnoty tahové zkoušky kompozitního materiálu
– 6 vrstev skelné výztuže

Kompozitní materiál - 6 vrstev skelné výztuže												
označení vzorku	E - modul pružnosti			σ_m - mez pevnosti			ε -poměrná deformace			W - deformační práce		
	MPa			MPa			%			N.mm		
	\bar{x}	s	v_k	\bar{x}	s	v_k	\bar{x}	s	v_k	\bar{x}	s	v_k
CH1-6-I.	14 570	1 812,0	12,43	315	12,5	3,96	2,3	0,1	5,93	2 152,65	238,82	11,09
CH1-6-II.	14 200	1 682,0	11,85	304	11,2	3,69	2,2	0,1	5,78	1 996,14	214,44	10,74
CH1-6-III.	13 630	1 416,0	10,39	284	14,7	5,18	2,1	0,2	7,91	1 756,35	189,27	10,78
CH2-6-I.	14 160	1 711,0	12,08	303	13,6	4,47	2,1	0,1	5,69	1 850,65	211,53	11,43
CH2-6-II.	14 370	1 193,0	8,31	298	18,0	6,04	2,1	0,1	4,01	1 816,83	243,75	13,42
CH2-6-III.	13 730	1 806,0	13,15	271	23,8	8,78	2,0	0,2	7,70	1 562,10	230,18	14,73
CH3-6-I.	14 560	2 238,0	15,37	274	26,8	9,78	1,9	0,2	9,71	1 498,60	271,93	18,15
CH3-6-II.	15 140	1 505,0	9,94	269	21,1	7,85	2,1	0,2	11,62	1 642,90	326,12	19,85
CH3-6-III.	15 540	981,3	6,31	268	29,1	10,88	1,9	0,2	12,40	1 497,65	324,18	21,65
HM-6-I.	13 640	1 257,0	9,21	307	22,7	7,38	2,4	0,2	7,79	2 108,71	324,04	15,37
HM-6-II.	15 080	2 289,0	15,18	278	36,9	13,26	2,1	0,4	17,85	1 698,08	465,40	27,41
HM-6-III.	15 040	1 690,0	11,24	267	39,3	14,70	2,0	0,3	15,29	1 602,48	451,48	28,17

10 HODNOCENÍ VÝSLEDKŮ ZKOUŠEK

Výsledkem praktické části diplomové práce je vyhodnocení výsledků tahových zkoušek kompozitních materiálů vyrobených z matric doporučených pro prepreg systémy. Celkem bylo odzkoušeno 360 zkušebních vzorků, které měly rozdílné složení skelné výztuže, rozdílné teploty a časy vytvrzení. Byly porovnány matrice rozdílného složení a rozdílných výrobců.

10.1 Vyhodnocení tahové zkoušky

Pro vyhodnocení mechanických vlastností jsme posuzovali zejména modul pružnosti a mez pevnosti kompozitních vzorků. Výběr nejvhodnější matrice byl rozdělen na tři hodnotící skupiny dle počtu skelné výztuže. Na kompozitní vzorky se dvěma, čtyřmi a šesti vrstvami výztuže. Vyhodnocení tahové zkoušky probíhalo na základě průměrných naměřených hodnot a tahových křivek zpracovaných do přehledných porovnávacích grafů.

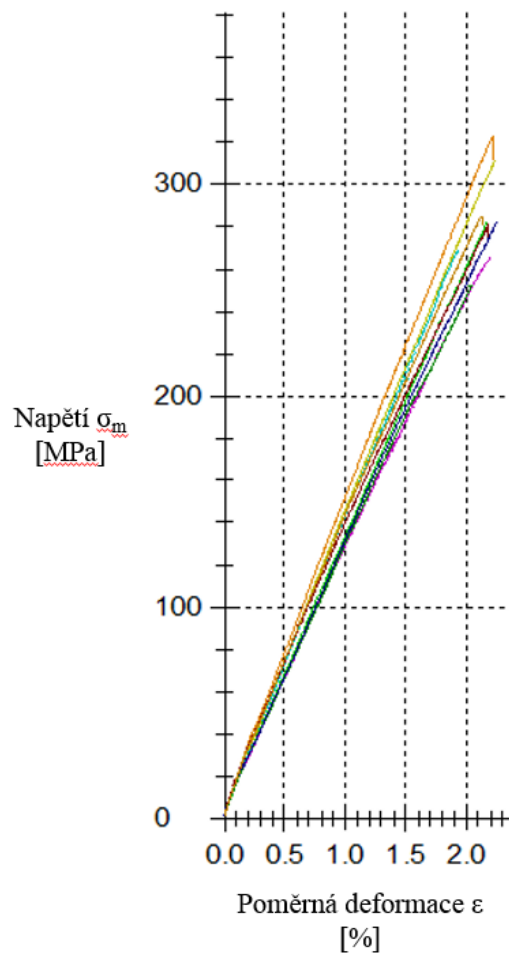
10.1.1 Kompozitní materiál - 2 vrstvy skelné výztuže

V tab. 24 jsou uvedeny tři kompozitní vzorky s nejlepším modulem pružnosti a mezí pevnosti. Z měření je patrné, že u dvouvrstvého kompozitního vzorku nebyla prioritní teplota vytvrzení, ale poměr jednotlivých složek pryskyřice.

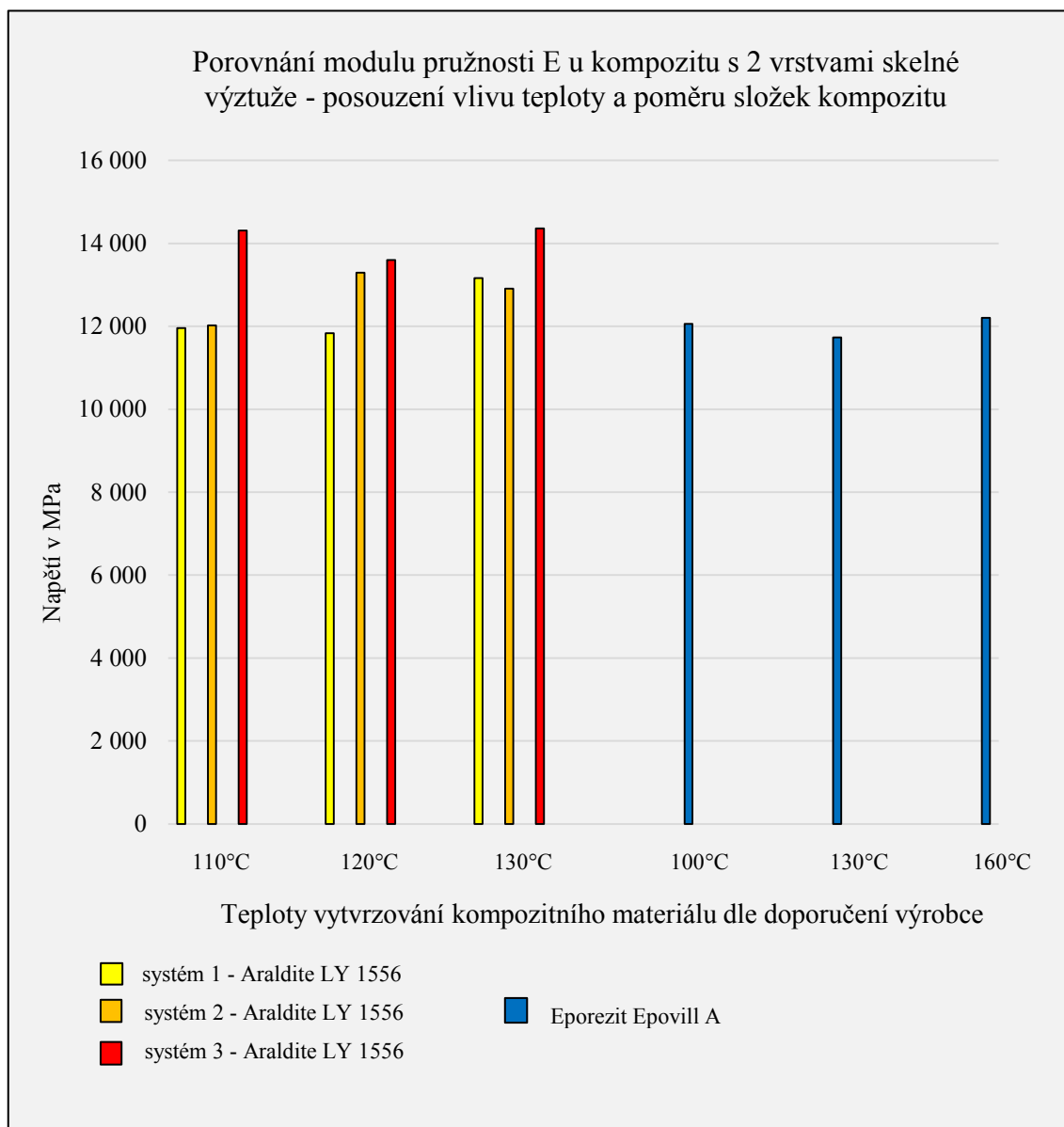
Nejvyšší modul pružnosti byl naměřen u vzorku Araldite LY 1556 - systém 3 s teplotou vytvrzení 160°C. Nejlepší hodnoty meze pevnosti má opět zkušební vzorek Araldite LY 1556 - systém 3 s teplotou vytvrzení 130°C. Na obr. 49 je průběh tahového napětí v závislosti na poměrné deformaci vzorku Araldite LY 1556 – systém 3, teplota vytvrzení 130°C, označení CH3-2-II.

Tab. 24 Zkušební vzorky dvouvrstvého kompozitu s nejlepšími mechanickými vlastnostmi.

Kompozitní materiál - 2 vrstvy skelné výztuže												
Označení vzorku	E - modul pružnosti			σ_m - mez pevnosti			ϵ -poměrná deformace			W - deformační práce		
	MPa			MPa			%			N.mm		
	\bar{x}	s	v_k	\bar{x}	s	v_k	\bar{x}	s	v_k	\bar{x}	s	v_k
CH3-2-I.	14 310	2 216,0	15,49	260	36,7	14,12	2,0	0,3	13,21	584,05	148,22	25,38
CH3-2-II.	13 600	887,1	6,52	284	21,9	7,74	2,1	0,1	4,97	649,57	42,54	6,55
CH3-2-III.	14 360	1 028,0	7,16	262	43,9	16,79	2,0	0,3	16,51	572,76	169,12	29,53

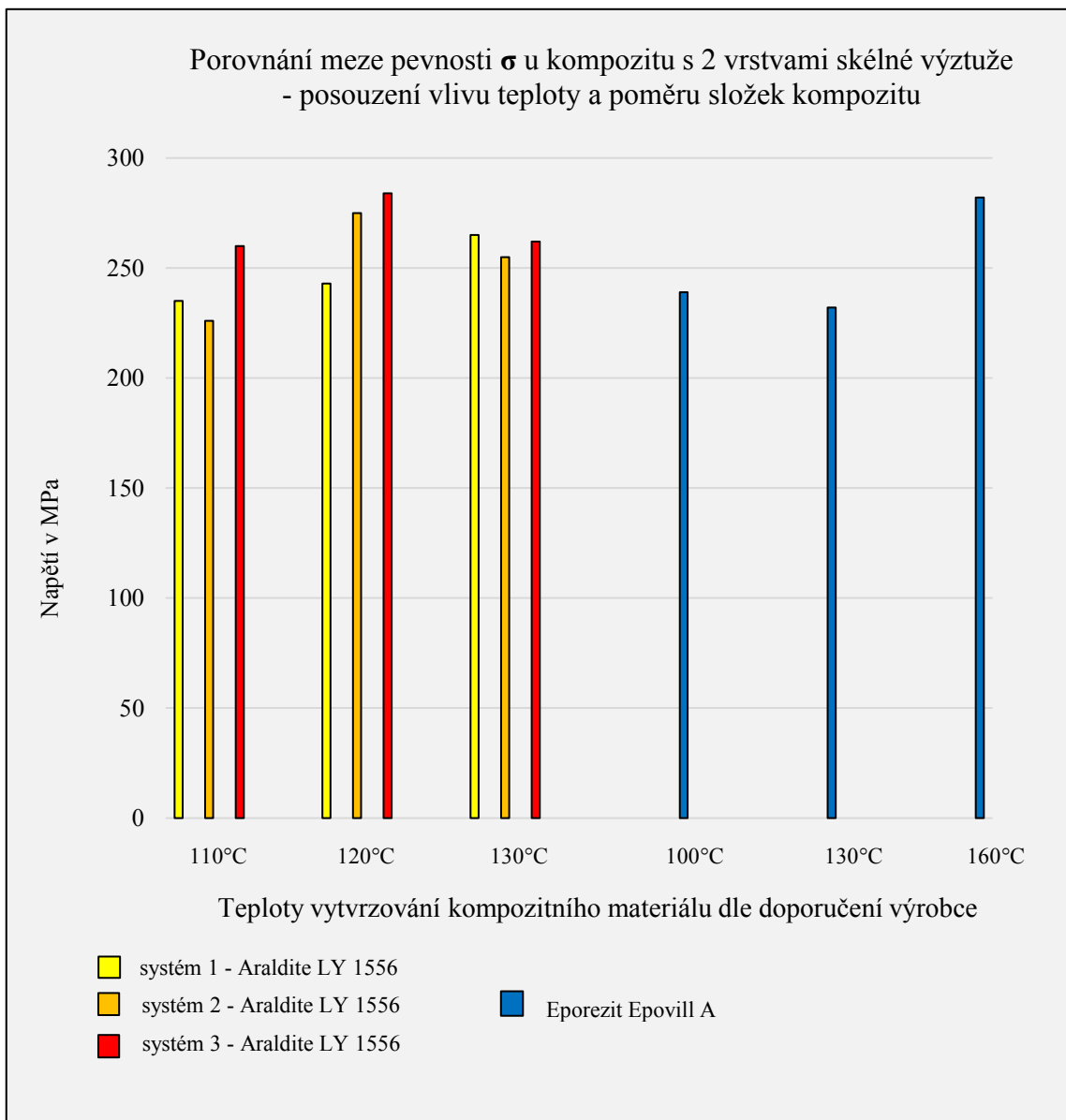


Obr. 49 Průběh tahového napětí v závislosti na poměrné deformaci vzorku Araldite LY 1556 – systém 3, teplota vytvrzení 130°C (ozn. CH3-2-II).



Obr. 50 Graf modelu pružnosti 2 vrstevných kompozitních vzorků

Modul pružnosti E – hodnoty modulu pružnosti u dvouvrstevných zkušebních vzorků jsou hodně podobné u všech vytvrzovacích teplot. S nárůstem poměru urychlovače ve složce Araldite LY 1556 tj. systém 3 jsou hodnoty modulu pružnosti nejvyšší. Na obr. 50 je zobrazen graf modelu pružnosti 2 vrstevných kompozitních vzorků.



Obr. 51 Graf meze pevnosti 2 vrstevných kompozitních vzorků

Mez pevnosti σ_m – hodnoty meze pevnosti u dvouvrstevných zkušebních vzorků nám opět potvrdily podobné hodnoty jak u modulů pružnosti s malými rozdíly naměřených hodnot. U meze pevnosti už vidíme mírné zvýšení naměřených hodnot s přibývajícím teplotou vytvrzení. U matrice Araldite LY 1556 se nám opět hodnoty zvyšují s nárůstem poměru urychlovače ve složce. Na obr. 51 je zobrazen graf meze pevnosti 2 vrstevných kompozitních vzorků.

10.1.2 Kompozitní materiál - 4 vrstvy skelné výztuže

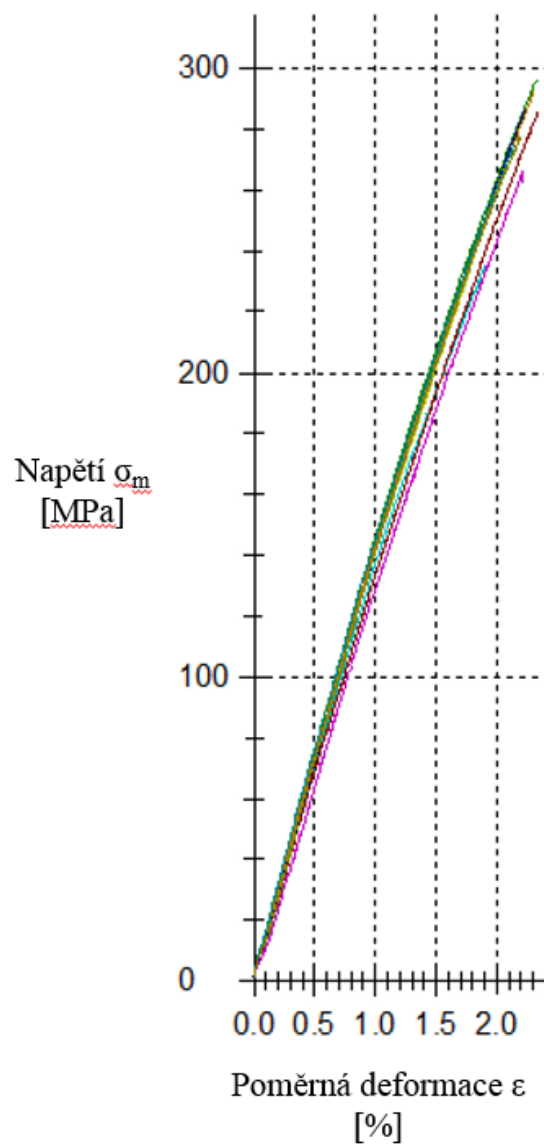
V tab. 25 jsou uvedeny čtyři kompozitní vzorky, které vykazují nejlepší výsledky měření. Z měření je patrné, že u čtyřvrstvého kompozitního vzorku s přibývajícím teplotou vytvrzení klesaly hodnoty modulu pružnosti E a meze pevnosti σ téměř u všech aplikací. Nejlepších naměřených hodnot bylo docíleno při teplotách od 120 do 130°C.

Nejvyšší modul pružnosti E měl vzorek Aporezit Epovill A s teplotou vytvrzení 130°C. Nejlepší hodnoty meze pevnosti σ má opět zkušební vzorek Aporezit Epovill A s teplotou vytvrzení pouze 100°C. Na obr. 52 je průběh tahového napětí σ v závislosti na poměrné deformaci ε vzorku Eporezit Epovill A, teplota vytvrzení 130°C.

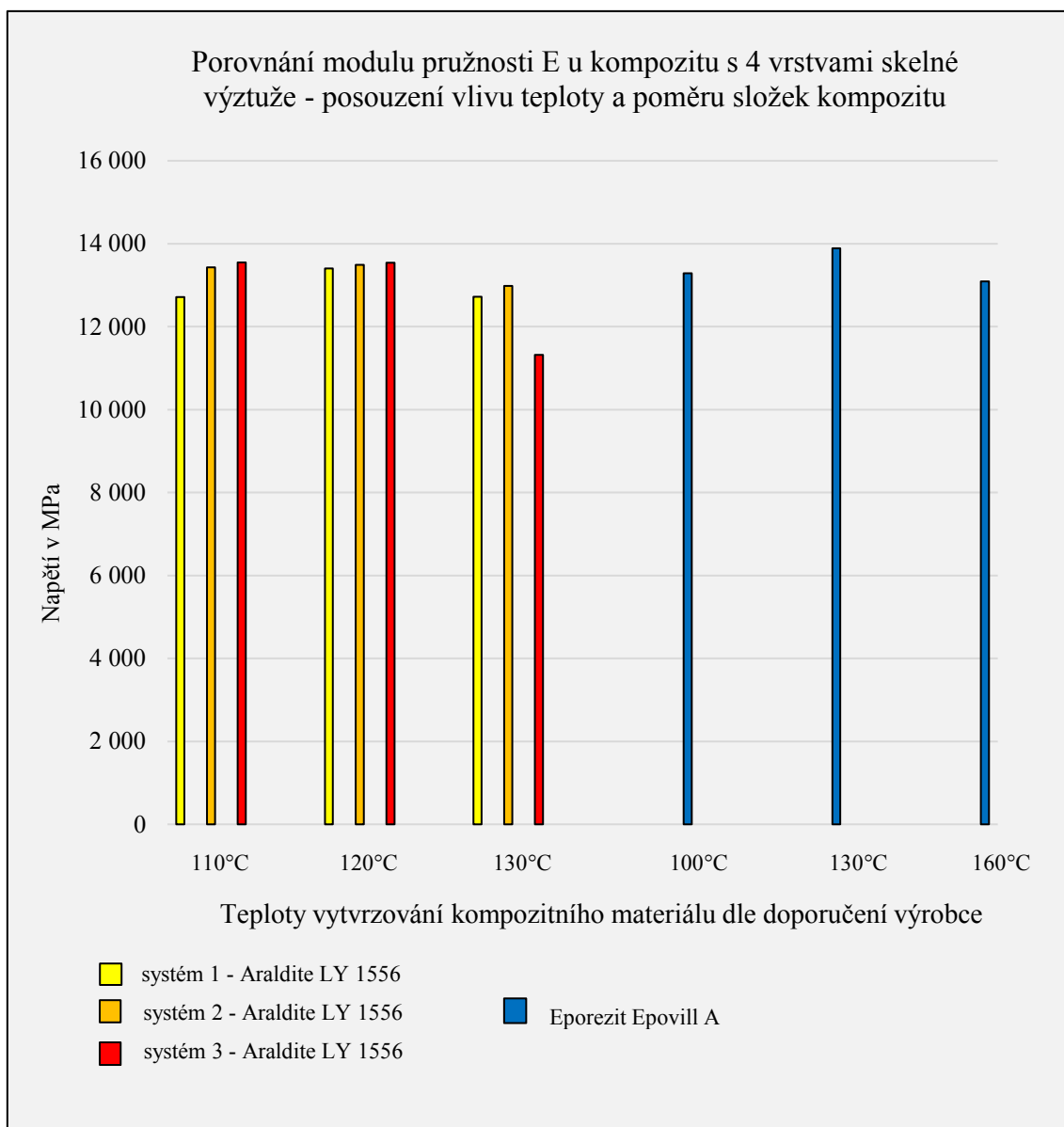
Z grafu je také patrné, že nejhorsích výsledků měření modulu pružnosti E a meze pevnosti σ byly naměřeny pouze u aplikace Araldite LY 1556 - systém 3. Tato aplikace byla v dvouvrstvého kompozitního vzorku shledána jako matrice s nejlepšími mechanickými vlastnostmi.

Tab. 25 Zkušební vzorky čtyřvrstvého kompozitu s nejlepšími mechanickými vlastnostmi.

Kompozitní materiál - 4 vrstvy skelné výztuže												
Označení vzorku	E - modul pružnosti			σ_m - mez pevnosti			ε -poměrná deformace			W - deformační práce		
	MPa			MPa			%			N.mm		
	\bar{x}	s	v_k	\bar{x}	s	v_k	\bar{x}	s	v_k	\bar{x}	s	v_k
CH3-4-I.	13 550	895,0	6,61	266	29,9	11,24	2,1	0,2	9,31	1 177,33	231,94	19,70
CH3-4-II.	13 540	1873,0	13,84	275	25,7	9,35	2,1	0,2	8,23	1 224,37	218,02	17,81
HM-4-I.	13 290	932,6	7,02	288	10,6	3,67	2,5	0,2	6,46	1 677,04	178,22	10,63
HM-4-II.	13 890	583,2	4,20	277	18,4	6,64	2,2	0,1	6,00	1 350,12	150,39	11,14

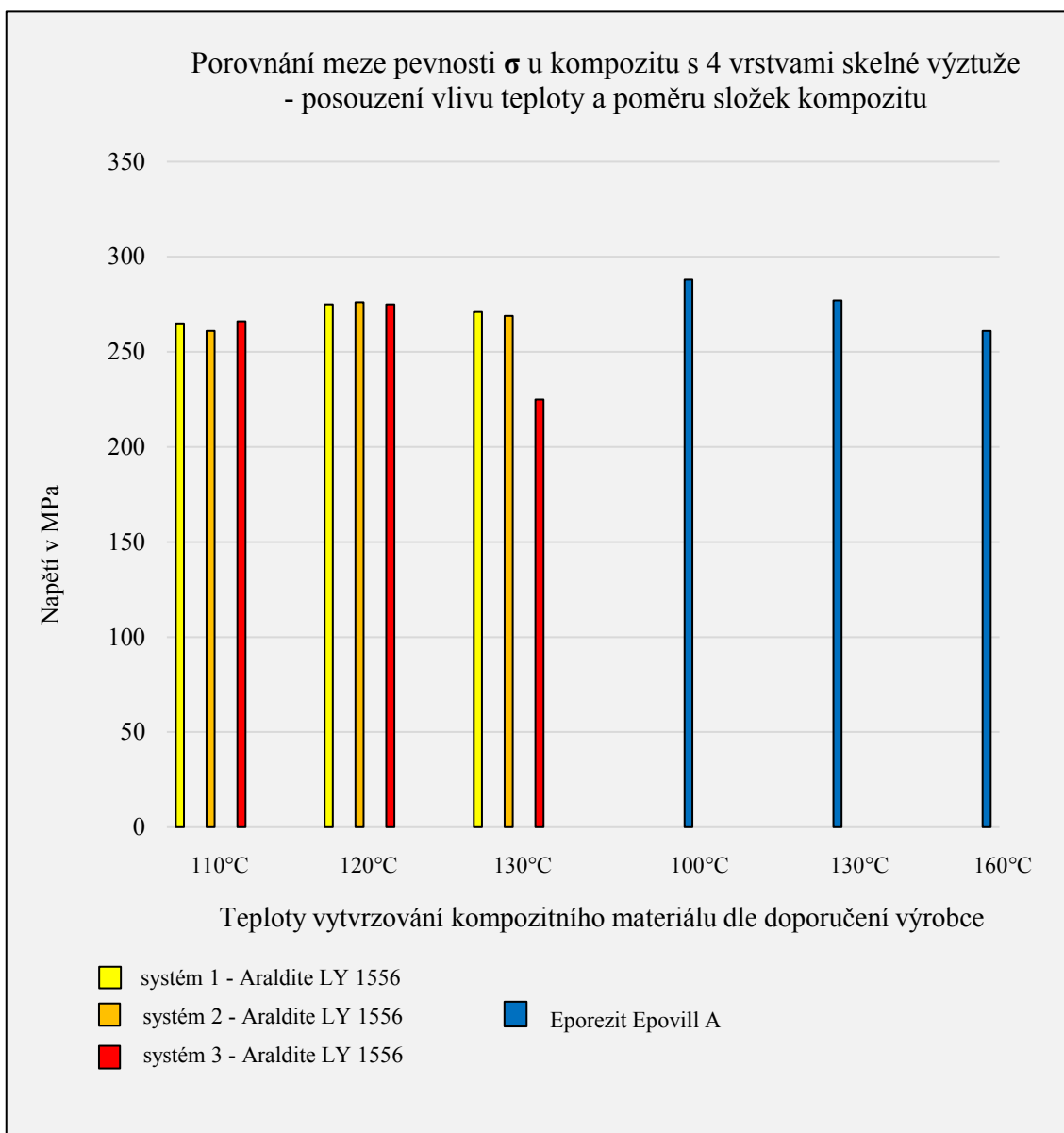


Obr. 52 Průběh tahového napětí v závislosti
na poměrné deformaci vzorku Eporezit Epovill A
– teplota vytvrzení 130°C (ozn. HM-4-II)



Obr. 53 Graf modelu pružnosti 4 vrstevných kompozitních vzorků

Modul pružnosti E – hodnoty modulu pružnosti u čtyřvrstevných zkušebních vzorků jsou hodně podobné téměř u všech vytvrzovacích teplot. Jen u aplikace Araldite LY 1556 - systém 3 byly naměřeny nejnižší hodnoty při vyšší teplotě vytvrzení 130°C. Na obr. 53 je zobrazen graf modelu pružnosti 4 vrstevných kompozitních vzorků.



Obr. 54 Graf meze pevnosti 4 vrstevných kompozitních vzorků

Mez pevnosti σ_m – hodnoty meze pevnosti u čtyřvrstevných zkušebních vzorků nám opět potvrdily podobné hodnoty jak u modulů pružnosti s malými rozdíly naměřených hodnot. U meze pevnosti už vidíme mírný pokles naměřených hodnot s přibývajícím teplotou vytvrzení. U aplikace Araldite LY 1556 - systém 3 byly naměřeny nejnižší hodnoty při vyšší teplotě vytvrzení 130°C. Na obr. 54 je zobrazen graf meze pevnosti 4 vrstevných kompozitních vzorků.

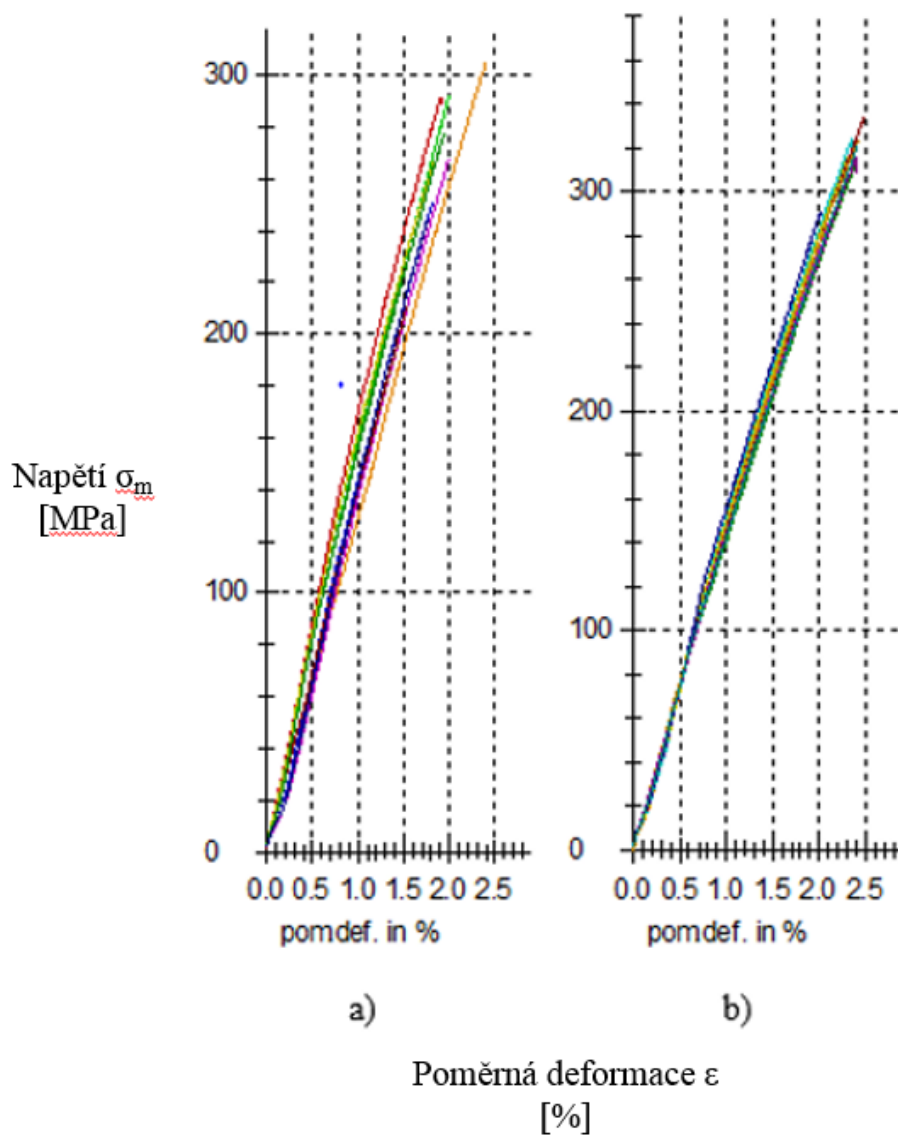
10.1.3 Kompozitní materiál - 6 vrstvy skelné výztuže

V tab. 26 jsou uvedeny kompozitní vzorky, které vykazují nejlepší výsledky měření. Z měření je patrné, že u šestivrstvého kompozitního vzorku jsou hodnoty modulu pružnosti E a meze pevnosti σ dosti odlišné. S přibývajícím teplotou vytvrzení stoupaly hodnoty modulu pružnosti E pouze u vzorků aplikace Araldite LY 1556 – systém 3 a aplikace Eporezit Epovill A. Ostatní složky měly s přibývajícím teplotou klesající charakter měřených hodnot modulu pružnosti. Mez pevnosti σ mají všechny aplikace s přibývajícím teplotou vytvrzení klesající charakter. Nejlepších naměřených hodnot meze pevnosti bylo docíleno při teplotách od 100 až 120°C.

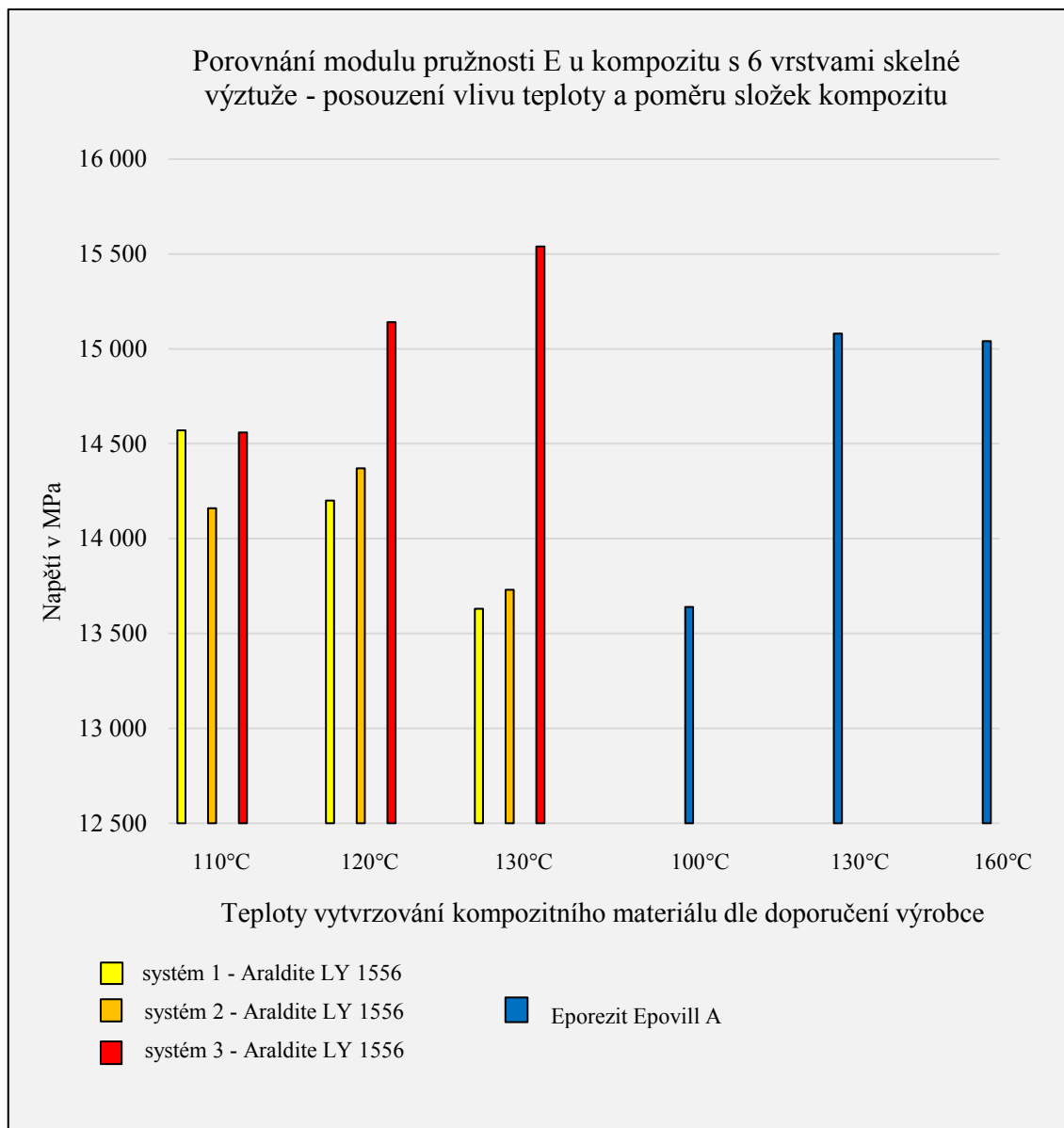
Nejvyšší modul pružnosti E měl vzorek Araldite LY 1556 – systém 3 s teplotou vytvrzení 130°C. Nejlepší hodnoty meze pevnosti σ měl zkušební vzorek Araldite LY 1556 – systém 1 s teplotou vytvrzení 110°C. Na Obr. 55 je průběh tahového napětí σ v závislosti na poměrné deformaci ε vzorku Araldite LY 1556 – systém 3 s teplota vytvrzení 130°C a vzorku Araldite LY 1556 – systém s teplota vytvrzení 110°C.

Tab. 26 Zkušební vzorky šestivrstvého kompozitu s nejlepšími mechanickými vlastnostmi

Kompozitní materiál - 6 vrstev skelné výztuže												
Označení vzorku	E - modul pružnosti			σ_m - mez pevnosti			ε -poměrná deformace			W - deformační práce		
	MPa			MPa			%			N.mm		
	\bar{x}	s	v_k	\bar{x}	s	v_k	\bar{x}	s	v_k	\bar{x}	s	v_k
CH1-6-I.	14 570	1 812,0	12,43	315	12,5	3,96	2,3	0,1	5,93	2 152,65	238,82	11,09
CH1-6-II.	14 200	1 682,0	11,85	304	11,2	3,69	2,2	0,1	5,78	1 996,14	214,44	10,74
CH3-6-II.	15 140	1 505,0	9,94	269	21,1	7,85	2,1	0,2	11,62	1 642,90	326,12	19,85
CH3-6-III.	15 540	981,3	6,31	268	29,1	10,88	1,9	0,2	12,40	1 497,65	324,18	21,65
HM-6-I.	13 640	1 257,0	9,21	307	22,7	7,38	2,4	0,2	7,79	2 108,71	324,04	15,37
HM-6-II.	15 080	2 289,0	15,18	278	36,9	13,26	2,1	0,4	17,85	1 698,08	465,40	27,41

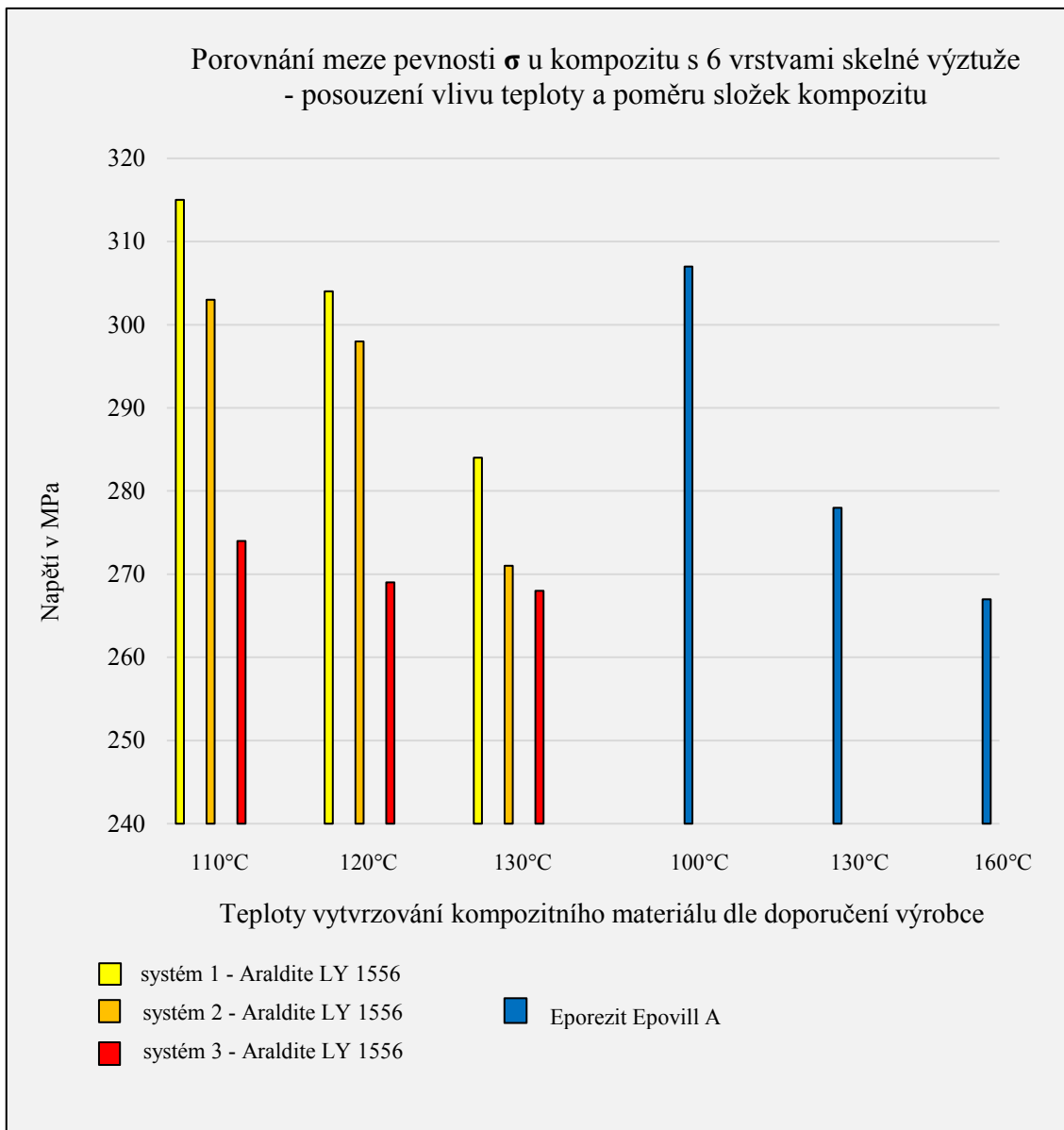


Obr. 55 Průběh tahového napětí v závislosti na poměrné deformaci vzorku: a) Araldite LY 1556 – systém 3 teplota vytvrzení 130°C (CH3-6-III), b) Araldite LY 1556 - systém 1 teplota vytvrzení 110°C (CH1-6-I)



Obr. 56 Graf modulu pružnosti 6 vrstevých kompozitních vzorků

Modul pružnosti E – hodnoty modulu pružnosti u šestivrstevých zkušebních vzorků jsou hodně odlišné. U vzorků aplikace Araldite LY 1556 – systém 3 a aplikace Epovill A se vzrůstající teplotou vytvrzování stoupají hodnoty modulu pružnosti. Naopak u aplikace Araldite LY 1556 - systém 1 a 2 naměřené hodnoty modulu pružnosti s teplotou vytvrzování klesají. Na obr. 56 je zobrazen graf modulu pružnosti 6 vrstevých kompozitních vzorků.

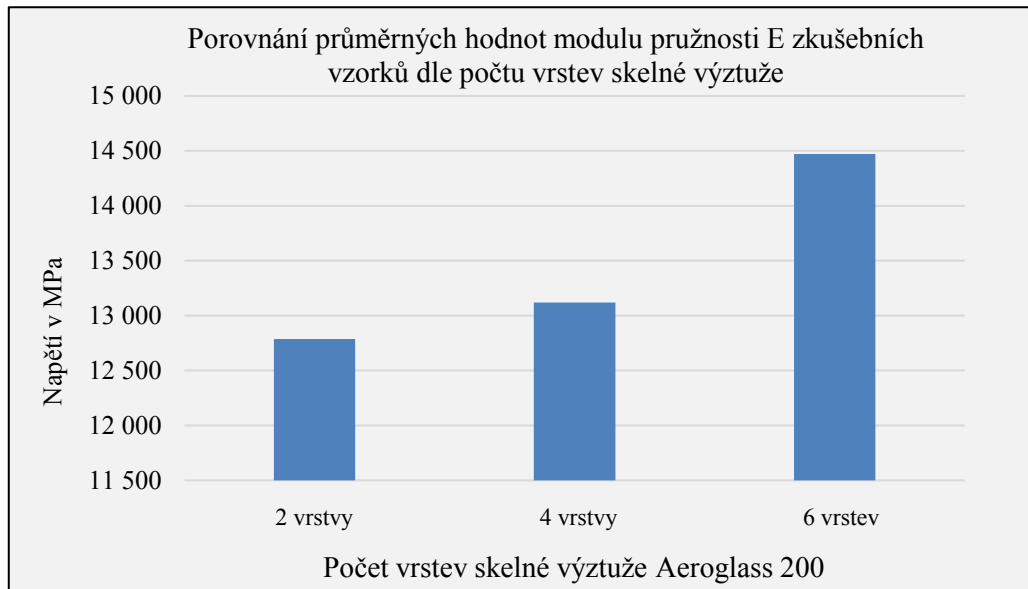


Obr. 57 Graf meze pevnosti 6 vrstevných kompozitních vzorků

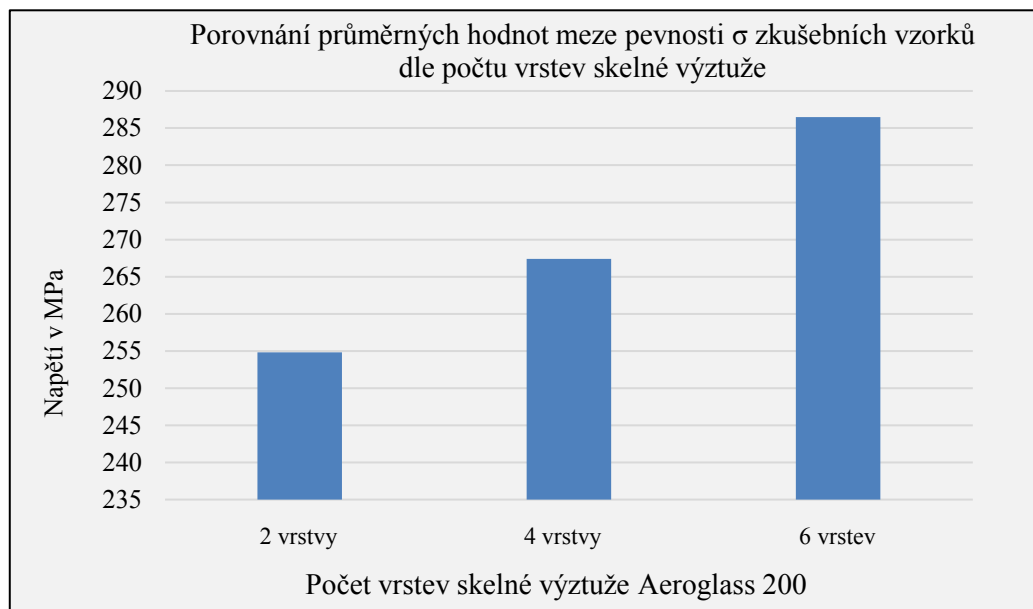
Mez pevnosti σ_m – hodnoty meze pevnosti u šestivrstevných zkušebních vzorků nám ukázaly odlišné hodnoty jak u modulů pružnosti. U meze pevnosti vidíme u všech vzorků s přibývajícím teplotou vytvrzení poměrně prudký pokles naměřených hodnot. Na obr. 57 je zobrazen graf meze pevnosti 6 vrstevných kompozitních vzorků.

10.1.4 Mechanické vlastnosti vzorků podle počtu vrstev

Na obr. 58 a obr. 59 je graficky znázorněn nárůst hodnot modulu pružnosti E a meze pevnosti σ v závislosti na počtu vrstev kompozitního vzorku. Graf znázorňuje průměrné hodnoty měření všech zkušebních vzorků.



Obr. 58 Porovnání průměrných hodnot modulu pružnosti E zkušebních vzorků dle počtu vrstev skelné výztuže.



Obr. 59 Porovnání průměrných hodnot meze pevnosti σ zkušebních vzorků dle počtu vrstev skelné výztuže.

ZÁVĚR

V dnešním světě kompozitních polymerních materiálů se již delší dobu vyskytuje pojem, který je synonymem vysoce pevného, teplotně odolného, tuhého a extrémně pevného high tech materiálu, nazývá se prepreg technologie. Prepreg systémy jsou polotovary k výrobě vláknových kompozitů a jejich hlavní složkou je předimpregnovaná výztuž napuštěná částečně vytvrzenými pryskyřicemi. Cílem diplomové práce je výzkum a posouzení vlastností matric vhodných pro výrobu prepreg systémů. To představovalo výrobu zkušebních kompozitních vzorků z prepreg matrice, vyhodnocení testovaných systémů a jejich vzájemné srovnání.

Teoretická část diplomové práce je zaměřena na kompozitní materiály a jejich rozdělení, dále na popis a vlastnosti vláken a matric pro polymerní materiály. Hlavní částí teoretické části je věnována popisu prepreg systémů, jejich rozdělení, způsobům výroby a popisu technologií zpracování kompozitů z prepregů.

Praktická část diplomové práce je zaměřena na výběr vhodné matrice a výztuže, a na výrobu a testování kompozitních vzorků z prepreg aplikací. Celkem bylo vyrobeno 360 kusů testovacích vzorků. Jako výztuž byla zvolena skelná tkanina Aeroglass 200, která byla kladena ve třech typech zkušebních vzorků (dvě, čtyři a šest vrstev). Jako polymerní matrice byla navržena aplikace Araldite LY 1556 a Eporezit Epovil A.

Po provedených tahových zkouškách kompozitních vzorků bylo provedeno vyhodnocení a vzájemné porovnání mechanických vlastností matric doporučených pro prepreg systémy. Porovnávány byly zejména mechanické vlastnosti jako model pružnosti E a mez pevnosti v tahu σ . Pro určení statistické nejistoty naměřených hodnot jsme použily směrodatnou odchylku s a variační koeficient v_k . Procentuální variabilita měření modulu pružnosti E a meze pevnosti σ se pohybovala od 2 do 20 % a žádné měření nevykazovalo výrazně odlišné hodnoty v_k .

U dvouvrstevých kompozitních vzorků byla zjištěna závislost poměru jednotlivých složek matrice. Teplota vytvrzení neměla podstatný vliv na mechanické vlastnosti. U hodnot meze pevnosti σ a hodnot modulů pružnosti E byly shledány malé rozdíly naměřených hodnot. S nárůstem poměru urychlovače ve složce Araldite LY 1556 se zlepšovali hodnoty modulu pružnosti E i meze pevnosti σ . Nejlepší vlastnosti vykazovala aplikace Araldite LY 1556 - systém 3 s nejvyšším poměrem urychlovače Accelerator 1573.

U čtyřvrstvých kompozitních vzorků s přibývajícím teplotou vytvrzení klesaly hodnoty modulu pružnosti E a meze pevnosti σ téměř u všech aplikací. Nejlepších naměřených hodnot bylo docíleno při teplotách od 120 do 130°C. Pouze aplikace Araldite LY 1556 - systém 3 vykazala nejnižší hodnoty měření. Přitom u dvouvrstvých vzorků byla sledována jako aplikace s nejlepšími vlastnostmi.

U šestivrstvého kompozitního vzorku jsou hodnoty modulu pružnosti E a meze pevnosti σ dosti odlišné. S přibývajícím teplotou vytvrzení stoupaly hodnoty modulu pružnosti E pouze u vzorků aplikace Araldite LY 1556 – systém 3 a aplikace Eporezit Epovill A. Ostatní složky měly s přibývajícím teplotou klesající charakter měřených hodnot modulu pružnosti. U meze pevnosti σ mají všechny aplikace s přibývajícím teplotou vytvrzení klesající charakter. Nejlepších naměřených hodnot meze pevnosti bylo docíleno jen při teplotách od 100 do 120°C.

Porovnáním vlastností matric vhodných pro výrobu prepreg systémů jsme došli k závěru, že jako nejvíce nestabilní matrice se ukázala aplikace Araldite LY 1556 – systém 3, která obsahuje větší množství urychlovače Accelerator 1573. Tento urychlovač zvyšuje hodnoty modulu pružnosti E , ale výrazně snižuje mez pevnosti σ . Při měření bylo také prokázáno, že teplota vytvrzení nemusí být rozhodující a vše je závislé na poměru složek pryskyřice a na počtu vrstev kompozitu.

Tímto experimentálním měřením jsme prokázaly důležitou úlohu výrobních systémů a vůbec použití prepreg systémů. Ruční výroba prepregů a hlavně prosycování tkaniny není tak přesné a efektivní jako strojní výroba, kde vyztužující tkanina nebo vlákna prochází přes válce (u procesu horké taveniny přes vyhřívané válce), kde působením teploty a tlaku dochází k dokonalé impregnaci výztuže bez přebytku množství matrice. U zkušebních vzorků s více vrstvami skelné výztuže nám se vzrůstající teplotou vytvrzení roste modul pružnosti E , ale výrazně nám klesá mez pevnosti σ . To může být způsobeno nedokonalým prosycením tkaniny nebo nadbytečným množstvím matrice v kompozitním vzorku. Přesné množství pryskyřice je důležitým faktorem mechanických vlastností kompozitních materiálů, při jeho nedodržení dochází k delaminaci a vzniku dutin, které se projeví na poklesu mechanických vlastností kompozitu. Hlavní předností prepreg systémů je vysoký poměr vláken s optimálním množstvím matrice.

High tech automatizované výrobní procesy s použitím prepreg systémů jsou dnes zárukou výroby těch nejvýkonnějších kompozitních dílů např. v letectví nebo kosmonautice.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] EHRENSTEIN, Gottfried W. *Polymerní kompozitní materiály*. V ČR 1. vyd. Praha: Scientia, 2009. ISBN 9788086960296.
- [2] LAPČÍK, Lubomír a Miroslav RAAB. *Nauka o materiálech II*. Vyd. 2., rozš. Zlín: Univerzita Tomáše Bati, 2004. ISBN 80-7318-229-7
- [3] DAĐOUREK, Karel. *Kompozitní materiály - modely a vlastnosti*. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2005. ISBN 80-7083-972-4.
- [4] BAREŠ, Richard. *Kompozitní materiály*. 1.vyd. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1988. 328 s.
- [5] LAŠ, Vladislav. *Mechanika kompozitních materiálů*. V Plzni: Západočeská univerzita, 2004. ISBN 80-7043-273-x.
- [6] AGARWAL, Bhagwan D. a Lawrence J. BROUTMAN. *Vláknové kompozity: celostátní vysokoškolská příručka pro vysoké školy technické*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1987.
- [7] DOLEŽAL, Jaroslav, Stanislav NEVYHOŠTĚNÝ a Michal TREGLER. *Využití nanovláken*. Technická univerzita Liberec. [prezentace]. [online]. [cit. 2017-03-18]. Dostupné z: https://nanoed.tul.cz/pluginfile.php/4244/mod_resource/content/0/vyuziti-nanovlaken.pdf
- [8] KOŘÍNEK, Zdeněk. *Kompozity*. [online]. [cit. 2017-04-14]. Dostupné z: https://drive.google.com/file/d/0B8vQSuH1vI_vOHVtQmxyTk41Y1k/view
- [9] FLYMAG. *Boeing 787 Dreamliner: Kompozitové letadlo*. [online]. [cit. 2017-04-25]. Dostupné z: <http://www.flymag.cz/article.php?id=11107>
- [10] BERAN, Michal. *Unikátní ultralehký dvojník L-39 Albatros vzlétl po sedmnácti letech vývoje k nebi*. Flying revue. [online]. 2016, č. 3 [cit. 2017-04-27]. Dostupné z: http://www.flying-revue.cz/l-39-ull?sibling_page=8
- [11] POLÁK, Michal. *Dream Chaser: v konkurenci návratových kapslí*. VTM [online]. [cit. 2017-04-12]. Dostupné z: <http://vtm.e15.cz/dream-chaser-v-konkurenci-navratovych-kapsli>
- [12] HEXPLY. *Prepreg Technology (1)*. [online]. [cit. 2017-03-11]. Dostupné z: <https://www.scribd.com/document/137540190/Prepreg-Technology-1-pdf>

- [13] SKOČOVSKÝ, Petr. *Nové konstrukční materiály: vybrané kapitoly*. Žilina: Vysoká škola dopravy a spojov, 1995. ISBN 807100264X.
- [14] KRČEK, Lukáš. *Karbon Parts, Karbon-kevralové díly*. [online]. [cit. 2017-03-28]. Dostupné z: <http://www.carbon-parts.cz/index.html>
- [15] PREFA KOMPOZITY. *Výroba a montáž kompozitních konstrukcí*. [online]. [cit. 2017-03-05]. Dostupné z: <http://www.prefa-kompozity.cz/technologie-vyroby/>
- [16] HUNTSMAN. *Prepregs*. [online]. [cit. 2017-03-12]. Dostupné z: http://www.huntsman.com/advanced_materials/a/Our%20Technologies/Ready%20to%20Use%20Formulated%20Systems/Composites/Prepregs
- [17] DIGOPAUL. *Prepreg*. [online]. [cit. 2017-04-11]. Dostupné z: <http://www.digopaul.com/cs/english-word/prepreg.html>
- [18] GOGIBUS, Nicolas. Solutions for Prepregging. Huntsman, Enriching lives through innovation.[online]. 2014, August [cit. 2017-03-01]. Dostupné z: http://www.huntsman.com/advanced_materials
- [19] CVUT. *Kompozitní materiály*. [studijní podklady]. [online]. 2014. [cit. 2017-02-22]. Dostupné z: http://umi.fs.cvut.cz/wp-content/uploads/2014/08/6_kompozitni-materialy.pdf
- [20] 5M CZ. *Semipregy*. [firemní web]. [online]. [cit. 2017-04-14]. Dostupné z: <http://www.5m.cz/produkty/semipregy>
- [21] THOMAS G.P. *Composite Prepregs – Manufacturing, Benefits and Applications*. AZO Materials [online]. 2013. April 16 [cit. 2017-03-19]. Dostupné z: <http://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=8353>
- [22] MAŇAS, Miroslav, Michal STANĚK a David MAŇAS. *Výrobní stroje a zařízení*. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2007. ISBN 978-80-7318-596-1.
- [23] FORM. *Prepreg technologie*. [firemní web]. [online]. [cit. 2017-04-06]. Dostupné z: <http://www.form-composite.com/prepreg>
- [24] BĚHÁLEK, Luboš. *Polymery: Mechanické vlastnosti polymerů – statické namáhání* [elektronická skripta]. 2016. [online]. [cit. 2017-02-14]. ISBN 978-80-88058-68-7. Dostupné z: <https://publi.cz/books/180/Cover.html>
- [25] HAVEL COMPOSITES. *Technologie*. [firemní web]. [online]. [cit. 2017-04-14]. Dostupné z: <http://www.havel-composites.com/clanky/4-Technologie.html>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

AF	Aramid Fiber.
AFP	Automated Fiber Placement.
ATL	Automated Tape Laying.
ATP	Advanced Technology Program.
BMC	Bulk Moulding Compounds.
BMI	Bismaleimidová pryskyřice.
CF	Carbon Fiber.
CTLM	Contour Tape Layer Machine.
CUD	Coefficient Utilisation Digestive Substrát.
DMC	Dough Moulding Compounds.
EP-R	Epoxidová pryskyřice.
FTLM	Flat Tape Layer Machine
HM	Vlákno s vysokým modulem pružnosti.
HT	Vysoce pevné vlákno.
LFRT	Long Reinforced Plastics.
LM	Vlákno s nízkou pevností.
MA-R	Metakrylátové pryskyřice.
OOA	Out of Autoklave.
PAN	Polyakrylonitril.
PFA-R	Fenakrylátové pryskyřice.
PZT	Piezoelektrická keramická vlákna.
RF	Radio Frequence.
SBR	Styren butadien kaučuk.
SiC	Keramická vlákna.
SMC	Sheet Molding Compound.
TTT	Temprerature Time Transformation.
UD	Jednosměrné uspořádání vláken.
UP	Unsaturated Polyester.
UP-R	Polyesterová pryskyřice.
VE	Vinyl Ester.
VE-R	Vinylesterová pryskyřice.
ε	[%] Poměrné prodloužení – deformace.
σ	[MPa] Smluvní napětí

σ_m	[MPa]	Mez pevnosti.
σ_y	[MPa]	Napětí, při kterém vzniká plastická deformace.
σ_b	[MPa]	Napětí při porušení zkušebního tělesa.
E	[MPa]	Modul pružnosti.
F	[N]	Síla.
F_{max}	[N]	Největší síla při měření.
W	[N.mm]	Deformační práce.
μ	[-]	Poissonův poměr.
ρ	[g/cm ³]	Hustota.
T _g	[°C]	Teplota skelného přechodu.
w _a	[%]	Hmotnostní poměr.
m _v	[g]	Hmotnost výztuže.
m _s	[g]	Hmotnost všech složek matrice.
S _o	[mm ²]	Průřez zkušebního tělesa.
L _o	[mm]	Počáteční délka zkušebního tělesa.
ΔL_o	[mm]	Zvětšení počáteční délky zkušebního tělesa.
x	[-]	Aritmetický průměr.
s	[-]	Směrodatná odchylka.
v _x , v _k	[%]	Variační koeficient.

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 1 Graf výsledných vlastností jednosměrného kompozitu - diagram vlastností kompozitu ve směru vláken</i>	13
<i>Obr. 2 Základní rozdělení kompozitních materiálů [4]</i>	14
<i>Obr. 3 Podíl jednotlivých materiálů při výrobě letadla Boeing 787 [9]</i>	17
<i>Obr. 4 Raketoplán nové generace Dream Chaser [11]</i>	18
<i>Obr. 5 Graf vlastností vybraných složek kompozitu</i>	19
<i>Obr. 6 Druhy tkaninových vazeb: Plain Weave – plátňová vazba, Satin Weave – saténová vazba, Twill Weave – keprová vazba [12]</i>	21
<i>Obr. 7 Způsoby uložení jednosměrných multiaxialních tkanin a jejich prošití [12]</i>	22
<i>Obr. 8 Skelné tkaniny – plátno, kepr, sekané vlákno [13]</i>	23
<i>Obr. 9 Aramidové tkaniny – kepr, satén [13]</i>	24
<i>Obr. 10 Uhlíkové (karbonové) tkaniny: karbon - kepr, karbon – kepr - široký, karbon - plátno, TeXtreme [13]</i>	26
<i>Obr. 11 Automobilový díl vyrobený z uhlíkové (karbonové) tkaniny [14]</i>	27
<i>Obr. 12 Síťovaná struktura polymerů pomocí příčných vazeb [16]</i>	32
<i>Obr. 13 Prepregy [16, 17]</i>	33
<i>Obr. 14 Výrobní proces prepregu: a) jednosměrného vlákna, b) tkaniny [12]</i>	36
<i>Obr. 15 Výrobní proces prepregu - úprava jednosměrného vlákna před impregnací [16]</i>	38
<i>Obr. 16 Výrobní proces prepregu – impregnace výztuže (Hot-melt systém) [16]</i> .	39
<i>Obr. 17 Výrobní proces prepregu „B–stav“ [16]</i>	39
<i>Obr. 18 Výrobní proces - vakuové zpracování prepregu v autoklávu [16]</i>	40
<i>Obr. 19 Proces uskladnění prepregu [16]</i>	40
<i>Obr. 20 Solvent prepreg systém – obrázek a výrobní schéma [16]</i>	41
<i>Obr. 21 Graf závislosti viskozity v čase výrobního rozpouštědlového způsobu - Solvent prepreg systému [16]</i>	42
<i>Obr. 22 Metoda horké taveniny výroby prepregu [16]</i>	43
<i>Obr. 23 Graf závislosti viskozity v čase výrobního Hot-melt systému [16]</i>	44
<i>Obr. 24 Chemický B-stav výrobní proces výroby prepregu [16]</i>	45
<i>Obr. 25 Graf závislosti viskozity v čase výrobního chemického B-stav systému [16]</i>	46

Obr. 26 Základní zkoušky kompozitních materiálů: a) pevnost v tahu, b)pevnost v tlaku, c) ohybová zkouška, d)smyková pevnost [12]	50
Obr. 27 Typické deformační křivky polymerů v tahu: a - křehké polymery; b, c - houževnaté polymery s mezí kluzu; d - houževnaté polymery bez meze kluzu.....	51
Obr. 28 Skelná tkanina AEROGLASS 200 [25]	55
Obr. 29 Separátor PVA a separační vosk Oskar´s M700/C WAX.....	61
Obr. 30 Vyhřívavý lis MITAS	63
Obr. 31 Zkušební zařízení ZWICK 1456.....	64
Obr. 32 Různé tvary zkušebních těles dle normy	66
Obr. 33 Příprava skelné tkaniny AEROGLASS 200: a) rozměření zkušebního vzorku, b) stříhání tkaniny	70
Obr. 34 Skelná tkanina AEROGLASS 200 připravená pro zkušební vzorky	71
Obr. 35 Příprava polymerní matrice – odměření složek pryskyřice.....	72
Obr. 36 Prosycení skelných vláken polymerní matricí: a) prosycování vlákna pryskyřicí, b) prosycená tkanina - prepreg	72
Obr. 37 Připravené formy pro lisování zkušebních vzorků	73
Obr. 38 Úprava povrchu formy separátorem Frekote.....	74
Obr. 39 Pokládání vrstev prepregu	75
Obr. 40 Prepreg s šesti vrstvami skelné tkaniny před uložením do formy.....	75
Obr. 41 Vložení formy do lisu	76
Obr. 42 Uzavření formy a vytvrzení matrice zkušebního vzorku	77
Obr. 43 Hotové kompozitní vzorky složky Eporezit Epovill.....	77
Obr. 44 Úprava zkušebních vzorků na požadovaný rozměr	78
Obr. 45 Zkušební vzorky upravené pro tahovou zkoušku	79
Obr. 46 Vadné polymerní vzorky – z důvodu slepení formy a nedostatečné teploty vytvrzování.....	80
Obr. 47 Zkouška tahem: a) uchycení vzorku do čelisti stroje, b) porušení zkušebního vzorku	82
Obr. 48 Rozměry zkušebního vzorku.....	83
Obr. 49 Průběh tahového napětí v závislosti na poměrné deformaci vzorku Araldite LY 1556 – systém 3, teplota vytvrzení 130°C (ozn. CH3-2-II).	87
Obr. 50 Graf modelu pružnosti 2 vrstevných kompozitních vzorků	88

<i>Obr. 51 Graf meze pevnosti 2 vrstvých kompozitních vzorků</i>	89
<i>Obr. 52 Průběh tahového napětí v závislosti na poměrné deformaci vzorku Eporezit Epovill A – teplota vytvrzení 130°C (ozn. HM-4-II)</i>	91
<i>Obr. 53 Graf modelu pružnosti 4 vrstvých kompozitních vzorků</i>	92
<i>Obr. 54 Graf meze pevnosti 4 vrstvých kompozitních vzorků</i>	93
<i>Obr. 55 Průběh tahového napětí v závislosti na poměrné deformaci vzorku: a) Araldite LY 1556 – systém 3 teplota vytvrzení 130°C (CH3-6-III), b) Araldite LY 1556 - systém 1 teplota vytvrzení 110°C (CH1-6-I)</i>	95
<i>Obr. 56 Graf modelu pružnosti 6 vrstvých kompozitních vzorků</i>	96
<i>Obr. 57 Graf meze pevnosti 6 vrstvých kompozitních vzorků</i>	97
<i>Obr. 58 Porovnání průměrných hodnot modulu pružnosti E zkušebních vzorků dle počtu vrstev skelné výztuže.</i>	98
<i>Obr. 59 Porovnání průměrných hodnot meze pevnosti σ zkušebních vzorků dle počtu vrstev skelné výztuže.</i>	98

SEZNAM TABULEK

<i>Tab. 1 Porovnání mechanických vlastností a hustoty vybraných vláken [1]</i>	20
<i>Tab. 2 Vlastnosti vybraných reaktivních pryskyřic</i>	29
<i>Tab. 3 Porovnání jednotlivých výrobních procesů v B-stavu výroby prepregu. [16]</i>	37
<i>Tab. 4 Rozpouštědlový způsob výroby - nabídka a parametry složek firmy Huntsman [16]</i>	42
<i>Tab. 5 Výrobní metoda horké tavenina - nabídka a parametry složek firmy Huntsman [16]</i>	44
<i>Tab. 6 Chemický B-stav výrobní systém - nabídka a parametry složek firmy Huntsman [16]</i>	46
<i>Tab. 7 Parametry aplikace Araldite LY 1556 [16]</i>	56
<i>Tab. 8 Parametry složky Araldite LY 1556 [16]</i>	57
<i>Tab. 9 Parametry složky Aradur 1571[16]</i>	57
<i>Tab. 10 Parametry složky Accelerator 1573 [16]</i>	58
<i>Tab. 11 Parametry složky Hardener 3471[16]</i>	58
<i>Tab. 12 Parametry aplikace Eporezit Epovill A/T-111[25]</i>	59
<i>Tab. 13 Parametry aplikace Eporezit Epovill A [25]</i>	60
<i>Tab. 14 Parametry aplikace Eporezit T-111 [25]</i>	60
<i>Tab. 15 Technické parametry vyhřívaného lisu MITAS</i>	62
<i>Tab. 16 Technické parametry zkušebního stroje ZWICK 1456</i>	64
<i>Tab. 17 Návrh zpracování a označení vzorků Araldite LY 1556</i>	67
<i>Tab. 18 Návrh zpracování a označení vzorků Eporezit Epovill</i>	68
<i>Tab. 19 Výpočet poměrových složek matrice dle hmotnostního poměru w_a</i>	69
<i>Tab. 20 Nastavené hodnoty měření stroje ZWICK 1456</i>	82
<i>Tab. 21 Průměrné naměřené hodnoty tahové zkoušky kompozitního materiálu – 2 vrstvy skelné výztuže</i>	84
<i>Tab. 22 Průměrné naměřené hodnoty tahové zkoušky kompozitního materiálu – 4 vrstvy skelné výztuže</i>	85
<i>Tab. 23 Průměrné naměřené hodnoty tahové zkoušky kompozitního materiálu – 6 vrstev skelné výztuže</i>	85
<i>Tab. 24 Zkušební vzorky dvouvrstvého kompozitu s nejlepšími mechanickými vlastnostmi</i>	87

<i>Tab. 25 Zkušební vzorky čtyřvrstvého kompozitu s nejlepšími mechanickými vlastnostmi.....</i>	<i>90</i>
<i>Tab. 26 Zkušební vzorky šestivrstvého kompozitu s nejlepšími mechanickými vlastnostmi.....</i>	<i>94</i>

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha P 1: Technický list skelné tkaniny Aeroglass 200.

Příloha P 2: Technický list složky Araldite® LY 1556.

Příloha P 3: Technický list složky Eporezit Epovill A/T-111.

Příloha P 4: Technický list separátoru PVA.

Příloha P 5: Technický list separátoru Frekote® 770 NC.

Příloha P 6: Hodnoty měření tahové zkoušky.