

Vliv prostředí na mechanické vlastnosti kompozitních materiálů

Bc. Kristýna Miklíková

Diplomová práce
2024



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická
Ústav výrobního inženýrství

Akademický rok: 2023/2024

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení:	Bc. Kristýna Miklíková
Osobní číslo:	T22384
Studijní program:	N3909 Procesní inženýrství
Studijní obor:	Výrobní inženýrství
Forma studia:	Prezenční
Téma práce:	Vliv prostředí na mechanické vlastnosti kompozitních materiálů

Zásady pro vypracování

- Literární rešerše na problematiku kompozitních materiálů pro průmyslové aplikace.
- Přehled kompozitních materiálů, výztužní systémy, vlastnosti a použití.
- Návrh kompozitní aplikace.
- Vliv vnějších podmínek na mechanické vlastnosti kompozitních materiálů.
- Experimentální testování dle doporučení.
- Vyhodnocení výsledků a formulace závěru.

Seznam doporučené literatury:

Barbero, Ever J., Introduction to composite materials design, Third edition, CRC Press, Taylor & Francis Group, CRC Press is an imprint of the Taylor & Francis Group an informa business, Boca Raton, 2018.

ŠUBA, Oldřich. Mechanika polymerů a kompozitů. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, ISBN 978-80-7454-015-8. 2011.

EHRENSTEIN GOTTFRIED, W. 2009. Polymerní kompozitní materiály. Praha, nakladatelství SCIENTIA v Praze, 351s, ISBN 978-80-86960-29-6, 2009.

Jim Low, Yu Dong: Composite Materials: Manufacturing, Properties and Applications, Edition: 1st, Elsevier, ISBN 978-0128205129, 2021.

Jawaid Mohammad, Thariq Mohamed, Saba Naheed: Aging Mechanisms in Polymer Composite Materials. Elsevier, ISBN 978-0-08-102298-6, 2019.

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

Datum zadání diplomové práce: **2. ledna 2024**

Termín odevzdání diplomové práce: **10. května 2024**

L.S.

prof. Ing. Roman Čermák, Ph.D. v.r.
děkan

doc. Ing. Martin Bednařík, Ph.D. v.r.
ředitel ústavu

Ve Zlíně dne 27. února 2024

PROHLÁŠENÍ AUTORKY DIPLOMOVÉ PRÁCE

Beru na vědomí, že:

- diplomová práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému a dostupná k nahlédnutí;
- na moji diplomovou 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;
- podle § 60 odst. 1 autorského zákona má Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- podle § 60 odst. 2 a 3 autorského zákona mohu užít své dílo – diplomovou 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);
- pokud bylo k vypracování diplomové práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tj. k nekomerčnímu využití), nelze výsledky diplomové práce využít ke komerčním účelům;
- pokud je výstupem diplomové práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Prohlašuji,

- že jsem na diplomové práci pracovala samostatně a použitou literaturu jsem citovala. V případě publikace výsledků budu uvedena jako spoluautorka.
- že odevzdaná verze diplomové práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou obsahově totožné.

Ve Zlíně dne:

Jméno a příjmení studentky:

.....
podpis studentky

ABSTRAKT

Diplomová práce se zabývá vlivem prostředí na mechanické vlastnosti polymerních kompozitu. Teoretická část pojednává o základních vlastnostech kompozitu se zaměřením na prepregy. Jsou zde popsány chemické a mechanické vlastnosti kompozitu, výroba prepregu a vzniklé vady v hotovém výrobku. V praktické části práce se budeme zabývat mechanickými vlastnostmi po expozici vybraných kapalin a jsou popsány jednotlivé zkoušky, které budou provedeny. Následně se popíše zvolený materiál kompozitu a jeho výroba s rozбором průběhu experimentu. V závěru se diskutují a vyhodnotí jednotlivé výsledky všech vybraných vzorků.

Klíčová slova: kompozit, prepregy, mechanické vlastnosti, expozice, agresivní látky, skelný prepeg, hybridní prepeg, uhlíkový prepeg

ABSTRACT

The thesis deals with the influence of the environment on the mechanical properties of polymer composites. The theoretical part discusses the basic properties of the composite with a focus on prepregs. The chemical and mechanical properties of the composite, prepreg production and the resulting defects in the finished product are described. In the practical part of the thesis, the mechanical properties after exposure to selected liquids are discussed and also the different tests will be performed are described. Subsequently, the selected composite material and its fabrication will be presented with an analysis of the experimental procedure. Finally, the individual results of all selected samples are discussed and evaluated.

Keywords: composite, prepreg, mechanical properties, exposure, aggressive substances, glass prepeg, hybrid prepeg, carbon prepeg

Děkuji doc. Ing. Soňi Rusnákové Ph. D. za odborné vedení, cenné rady a připomínky, které mi pomohly při zpracování této diplomové práce.

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

OBSAH

ÚVOD.....	10
I TEORETICKÁ ČÁST	12
1 KOMPOZITY.....	13
1.1 VLASTNOSTI.....	13
1.2 ROZDĚLENÍ.....	14
1.2.1 Kompozit s dlouhými vlákny	14
1.2.2 Kompozit s krátkými vlákny	15
1.2.3 Kompozit s částicovým plnivem.....	16
1.3 MATERIÁLY MATRICE	17
1.3.1 Polymerní matrice	17
1.3.2 Keramická matrice	18
1.3.3 Kovová matrice	18
2 POLYMERNÍ KOMPOZITY.....	20
2.1 VÝBĚR MATRICE.....	20
2.1.1 Termoplastické matrice	20
2.1.2 Reaktoplastické matrice	21
2.2 VÝBĚR TKANINY	22
2.3 PREPREG.....	23
3 VÝROBA PREPREGU.....	24
4 VLASTNOSTI.....	26
4.1 MECHANICKÉ VLASTNOSTI.....	26
4.2 CHEMICKÉ VLASTNOSTI	27
4.3 VADY OVLIVŇUJÍCÍ VLASTNOSTI	28
5 VLIV VLKOSTI NA MECHANICKÉ VLASTNOSTI PREPREGU.....	30
5.1 SNÍŽENÍ PEVNOSTI A TUHOSTI KOMPOZITU	30
5.2 ROZMĚROVÉ ZMĚNY KOMPOZITU	33
5.3 DEGRADACE MATERIÁLU MATRICE	34
5.4 SNÍŽENÁ ODOLNOST PROTI ÚNAVĚ	34
5.5 ELEKTRICKÉ A TEPELNÉ VLASTNOSTI PREPREGU	35
5.7 RŮST HUB A PLÍSNÍ	36
6 ZMĚNA MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ PREPREGU V AGRESIVNÍM PROSTŘEDÍ	38
6.1 UHLÍKOVÝ PREPREG	38
6.2 SKELNÝ PREPREG	39
6.3 HYBRIDNÍ PREPREG (UHLÍK-ARAMID).....	40

7	MĚŘENÍ MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ	41
7.1	TAHOVÁ ZKOUŠKA	41
7.2	TLAKOVÁ ZKOUŠKA	43
7.3	OHYBOVÁ ZKOUŠKA.....	44
7.4	TESTOVÁNÍ MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ KOMPOZITU	47
7.4.1	Testování ohybových vlastností.....	47
II	PRAKTICKÁ ČÁST.....	49
8	CÍLE DOSAŽENÍ PRAKTICKÉ ČÁSTI.....	50
9	VYUŽITÉ PREPREGY A PŘÍPRAVKY PRO ODFORMOVÁNÍ.....	51
9.1	CHEMLEASE A2191W	51
9.2	ZYVAX SEALER GP	51
9.3	PREPREG.....	52
10	POUŽITÉ AGRESIVNÍ LÁTKY A SEPAROVAČE.....	53
10.1	MOTOROVÝ OLEJ.....	53
10.2	ROZTOK 20 % CHLORIDU SODNÉHO VE VODĚ	53
10.3	ROZTOK 20 % KYSELINY SÍROVÉ VE VODĚ	54
10.4	ROZTOK 0,5 % INCIDIN RAPID	54
10.5	ROZTOK 0,5 % BACOBAN WB.....	54
11	POUŽITÉ PŘÍSTROJE.....	56
11.1	AUTOKLÁV.....	56
11.2	VODNÍ PAPERSEK	56
11.3	POPIS OHYBOVÉ ZKOUŠKY.....	56
11.4	POPIS TAHOVÉ ZKOUŠKY	57
12	VÝSLEDKY A PRŮBĚH MĚŘENÍ.....	59
12.1	OHYBOVÁ ZKOUŠKA.....	59
12.1.1	Referenční ohybová zkouška bez vlivu agresivních látek	59
12.1.2	Roztok vody v 0,5 % Incidin Rapid	62
12.1.3	Roztok vody s 20 % soli.....	65
12.1.4	Roztok vody v 0,5 % Baccoban	69
12.1.5	Roztok 20 % kyseliny sírové.....	72
12.1.6	Motorový olej.....	75
12.2	TAHOVÁ ZKOUŠKA	79
12.2.1	Referenční tahová zkouška bez vlivu agresivních látek	79
12.2.2	Roztok vody v 0,5 % Incidin Rapid	83
12.2.4	Roztok vody v 0,5 % Baccoban	90
12.2.5	Roztok 20 % kyseliny sírové.....	94
12.2.6	Motorový olej.....	97
13	DISKUZE	102

ZÁVĚR	103
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	105
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	109
SEZNAM OBRÁZKŮ	111
SEZNAM TABULEK.....	113
SEZNAM PŘÍLOH.....	115

ÚVOD

V dnešní době, kdy se technologie neustále rozvíjí a inovace jsou klíčové ve vývoji moderních materiálů, je nezbytné pečlivě zkoumat vliv prostředí na mechanické vlastnosti kompozitních materiálů. Tyto materiály, složené ze dvou nebo i více různých složek s odlišnými vlastnostmi, se stávají stále důležitějšími v mnoha odvětvích průmyslu, včetně leteckého, automobilového, a stavebního.

Kompozity se vyskytují na mnoha místech v naše světě, pouze si to neuvědomujeme, že jde právě o kompozity. V přírodě se nachází nejčastěji jako pevná organická hmota u živočichů. Mezi přírodní materiál řadíme dřevo, kosti, mušle apod. V historii též můžeme nalézt využití kompozitu u mongolských luků, kde kombinací dřeva a kůže dosáhly dobré pevnosti spolu s pružností.

Kompozity jsou materiály, které nám mohou usnadnit a zlepšit život. Staly se součástí dnešní moderní doby, především díky svým specifickým vlastnostem, mezi které patří jejich vysoká pevnost, odolnost proti korozi, dlouhá životnost.

Za kompozit se považuje cokoliv, co má nad 5 % druhého materiálu v prvním materiálu. Kompozity nám umožňují kombinovat mísitelné i nemísitelné materiály a tím dosáhnout kombinaci vlastností, které bychom jinak nezískali, z čehož plyne mnoho výhod. Jedna z největších předností při využití kompozitu je jejich nízká hmotnost. Na výrobu lze použít téměř cokoliv, kromě plynného média.

V této práci se budeme zabývat kompozity se skelnými, uhlíkovými vlákny a prepregy. Každý z nich má své výhody a nevýhody mechanických vlastností sami o sobě, protože jejich pojivo a výztuž mají rozdílné vlastnosti.

V teoretické části bude popsán kompozit, jeho vlastnosti, výroba. Praktická část bude srovnávat vybrané kompozity vystaveny různým kapalinám a tlakům. Výsledky budou následně srovnány, analyzovány a vyhodnocovány.

Cílem této práce bude poskytnout kompletní pohled na problematiku vlivu prostředí na mechanické vlastnosti kompozitních materiálů a získat hlubší porozumění mechanismů, stojících za těmito změnami. Tyto údaje, pak mohou sloužit jako základ pro vývoj nových materiálů s vylepšenou odolností v konkrétních prostředích a stát se důležitým faktorem při navrhování a výrobě moderních struktur a zařízení.

V rámci této práce budou provedeny experimenty, analytické metody a simulace, které umožní zhodnotit, jak různé kapaliny a tlaky ovlivňují vlastnosti kompozitních materiálů. Výsledky této studie budou přínosné nejen pro akademickou oblast, ale také pro průmyslové odvětví, kde při pochopení vystaveným vlivům může posloužit k vývoji odolnějších a spolehlivějších materiálů pro budoucnost.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 KOMPOZITY

Kompozitní materiály představují skupinu materiálů složených ze dvou nebo více rozdílných komponent, vzájemně propojených, aby vytvářely strukturu se synergickými vlastnostmi. Komponenty rozdělujeme na matrice a výztuže. Matrice mohou být polymerní, kovová, keramická či jiná látka. Výztuha bývá tvořena skleněnými, uhlíkovými, aramidovými vlákny. Tyto kombinace umožňují docílit vzniku materiálu s lepšími vlastnostmi, než by měly jednotlivé komponenty samy o sobě. Každý kompozit nabývá určitých vlastností dle velikosti plniva nebo druhu využitého materiálu. [1]

1.1 Vlastnosti

Kompozitní materiály nabízejí řadu výhod, mezi ně řadíme vysokou pevnost, nízkou hmotnost, odolnost vůči korozi či schopnost přizpůsobit se specifickým požadavkům pro konkrétních použití. Těchto vlastností dosahujeme synergii mezi matricí a výztuhou, kdy matrice poskytuje ochranu a udržuje tvar a výztuha pevnost a tuhost. [2]

Komponent využívá dvou neslučitelných materiálů, aby zesílily vlastnosti jako třeba u polymerní matrice s dlouhými vlákny nebo se spojili dva neslučitelné materiály k sobě, jako v případě slinutých karbidů. Nejlepší vlastnosti vykazují kompozity plněné silnými vlákny. Částice nejsou moc efektivní ke zlepšení vlastností jako je pevnost. Pokud kompozit nesplňuje všechny vlastnosti ve dvousložkovém provedení, tak se mohou dodat další složky a vytvořit vícesložkový kompozit. Další možností zpevnění a zlehčení kompozitu lze dosáhnout sendvičovou strukturou, což nám zajistí jednu z největších výhod, a to v podobě odolnosti vůči korozi, zmenšení hmotnosti součásti. Důležitou vlastností, využívající se u kompozitu bývá otěruvzdornost, teplotní odolnost, vodivost elektrického proudu a jiné vlastnosti, závisující na typu kompozitu. Často se preferují nízko-hmotnostní kompozity pro odlehčení dílů. Matrice těchto dílů bývá křehká, ale pevná, vlákna se jednoduše ohnou a zlomí, přesto si však zachovávají dobrou tahovou pevnost a pružnost. Částice nepřinášejí zásadně velkou pomoc při zlepšení vlastností, přesto při slouží k odlehčení kompozitu. [1], [3]

1.2 Rozdělení

Kompozity představují rozsáhlou skupinu materiálů vznikající spojením dvou a více rozdílných složek s cílem vytvořit materiál s požadovanými vlastnostmi. Samotné rozdělení kompozitu může být prováděno dle matrice, typu využitých vláken, struktury vytvořeného materiálu a také podle účelu, pro který byl kompozit navržen.

Kompozity se dělí dle velikosti částic v matrice na ty s dlouhými vlákny, s krátkými vlákny a s částicemi. [2]

1.2.1 Kompozit s dlouhými vlákny

U kompozitu s dlouhými vlákny se jedná o materiál kombinující několik složek za účelem dosáhnout optimálních vlastností. V tomto případě sehrávají vlákna jednou z klíčových složek poskytujících materiálu požadovanou pevnost a odolnost. Tyto kompozity disponují téměř nekonečnou délkou vláken, které může být uloženo v různých polohách. Takové kompozity známe jako vláknové kompozity a děleny bývají podle orientace vláken a struktury. Směr vláken udává pevnost často pouze v jednom směru a kolmo na vlákna nebývají téměř vůbec silově pevná. Takto uspořádané plátno se nazývá roving. Roving bývá využit především v procesu výroby kompozitu, hlavně u laminátů. Tyto vlákna se pak uspořádávají a spojují do pevného svazku. Dlouhá vlákna mohou být vyráběná z materiálů například skla, uhlíku, aramidového vlákna (například Kevlar) či polymerního vlákna. [4]



Obrázek 1 Kompozit s dlouhými vlákny [5]

Hlavní vlastnosti kompozitu s dlouhými vlákny:

- Zlepšená pevnost: zlepšují pevnost kompozitu na rozdíl od mono-materiálu.
- Zvýšená tuhost: vyšší tuhost díky dlouhým vláknům, což bývá výhodné tam, kde potřebujeme odolnost vůči deformaci.
- Odolnost proti trhání
- Nízká hmotnost
- Orientace vláken: správné orientaci vláken vzhledem k očekávaným silovým směrům. [6], [7]

1.2.2 Kompozit s krátkými vlákny

Kompozity s krátkými vlákny nazýváme takový typ materiálů, kdy do matrice přidáváme krátká vlákna. Velikost vlákna bývá často dána dle průměru, délka bývá zhruba stonásobek průměru, jedná se obvykle o délku několika milimetrů až centimetrů rovnoměrně distribuovaných v matrici. Na rozdíl od kompozitu s dlouhými vlákny mohou být tyto krátká vlákna s náhodnou či náhodnější orientací. Záleží, zda máme stejné nebo rozdílné délky, protože rozdílná délka nám ovlivňuje konce vláken. V kompozitu velmi záleží na uspořádání vláken, zda bývá uspořádáno do pravidelného nebo nepravidelného uspořádání. Tento typ kompozitu se vyrábí různými způsoby (vstřikování, lisování, lití). Tyto krátká vlákna mohou být vyrobená z materiálů například sklo, uhlík, speciální polymerní materiály. [6]



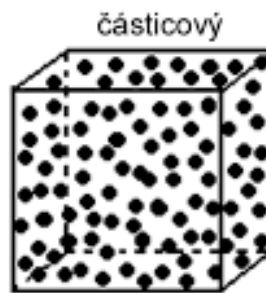
Obrázek 2 Kompozit s krátkými vlákny [5]

Vlastnosti a charakteristiky kompozitu s krátkými vlákny:

- Zlepšená pevnost: Přidání krátkých vláken se zvýší pevnost materiálu, především ve směru, ve kterém bývají vlákna orientována.
- Zvýšená tuhost proti trhání
- Snížená nákladnost: dosahujeme ekonomičtější výroby, především pokud používáme standardní výrobní postupy.
- Orientace vláken: mohou být pevně řízena při výrobě, a tak se umožňuje optimalizace mechanických vlastností v konkrétních směrech. [7]

1.2.3 Kompozit s částicovým plnivem

Kompozity s částicovým plnivem řadíme mezi materiály, v nichž do matrice přidáváme částice pevného materiálu za účelem zlepšit nebo modifikovat vlastnosti materiálu. Částicová plniva mohou být rozličných tvarů i velikostí a bývají dodávány do matrici tak, aby vylepšily určité vlastnosti materiálu. Částicové kompozity zlepšují vlastnosti především na rozhraní částice vůči matrici. Plnivo nemusí mít pouze kulový tvar, může být například ve tvaru vloček nebo lupínků. Tyto částice rovnoměrně dispergujeme do matrice. Mohou se dělit dle velikosti na kompozit s mikro nebo makro částicemi. [2]



Obrázek 3 Kompozit s částicovým plnivem [5]

Vlastnosti kompozitu s částicovým plnivem:

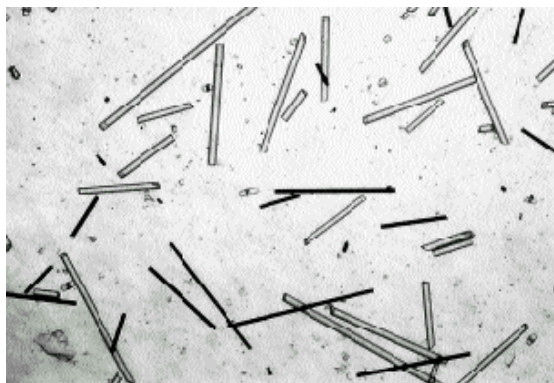
- Zlepšení pevnosti
- Zvýšená tvrdost
- Zlepšení otěruvzdornosti
- Zvýšená odolnost proti krátkodobým teplotním výkyvům
- Zvýšení hustoty nebo hmotnosti
- Elektrické nebo tepelné vlastnosti [8]

1.3 Materiály matrice

Materiály matrice mají svou důležitou roli u kompozitních materiálů, jelikož tvoří matici, do které vkládáme vlákna či částice. Volba správného materiálu matrice bývá odvislá na mnoha faktorech. Záleží vždy na požadovaných mechanických vlastnostech, chemické odolnosti, teplotní stabilitě a nákladů na výrobu daného výrobku. [9]

1.3.1 Polymerní matrice

V současné době jsou polymerní matrice běžně používané v kompozitech. Mohou zahrnovat oxid hliníku, oxid zirkonia nebo karbid křemíku. U matrice bývá obecně vyztužena keramickými vlákny, protože mají vysokou pevnost ve srovnání s polymerním materiálem matrice. Charakteristika polymerní matrice závisí na matici, výztuži, procesních parametrech, mikrostruktuře, složení a mezifázi. Polymerní matrice bývají využívány především pro svou příznivou cenu a svůj snadný způsob výroby. Tvůrci těchto matic mohou vytvářet cenově výhodné produkty s různými výrobními postupy. Každý výrobní proces má vlastnosti definující druh produktu, který má být vyroben. Tato odbornost umožňuje výrobcům nabídnout nejlepší volbu pro spotřebitele. Kompozity s polymerní maticí se skládají z termoplastických nebo reaktoplastických polymerů matrice s jednou i více výztužemi, které mohou být uhlíková, skelná, ocelová a přírodní vlákna. Polymery produkují dobré komponenty, pro svoji dobrou zpracovatelnost. Mezi nezbytnou vlastnost polymerů se řadí lehkost. Polymerní matrice nabízí širokou škálu vlastností, k nimž patří vysoká pevnost, vynikající náraz, komprese, únavové vlastnosti, nákladově efektivní procesy výroby a obrábění, vynikající chemická odolnost a odolnost proti korozi. Využití těchto matic se uplatňuje především v raketách, letadlech a sportovním vybavení a v mnoha dalších odvětvích. [10], [11]



Obrázek 4 Vlákna v polymerní matici [12]

1.3.2 Keramická matrice

Používají se v kompozitech vyžadujících odolnost před vysokými teplotami a chemickými látkami. Keramické matricové kompozity bývají směsí keramických částic a vláken, mohou být definovány jako pevné materiály, které normálně vykazují vysoce silnou vazbu iontovou, též se může vyskytovat kovalentní vazba. Keramická matrice může být vyztužena keramikou, kovy, skly a polymery. Matricové materiály na bázi keramiky mají výjimečnou odolnost proti korozi, vysoké body tání, vynikající pevnost v tlaku a stabilitu při vysokých teplotách. Keramické matrice se běžně volí pro vysokoteplotní aplikace, v podobě pístů, lopatky, rotory v částech plynových turbín. Mohou přežít při vysokých teplotách a efektivně fungovat v korozivním prostředí. Při výrobě se hledá vždy postup, jak zvýšit houževnatost, z důvodu, že monolitická keramika má svou křehká, ale naopak i vysokou tuhost a pevnost. Hlavními nevýhodami této matrice nacházíme v poruchovosti při nízkém napětí, což omezuje napětí ve vláknu na nižších úrovních. Má také přiměřeně vysoký modul a nižší tažnost, které ji chrání před úpravou tepelného napětí z jakéhokoli druhu změny tepelné roztažnosti. [13], [14]

Dva hlavní typy keramických matic:

- Oxidové keramiky: Do této kategorie se zahrnují materiály jako oxid hlinitý (Al_2O_3), oxid křemičitý (SiO_2), oxid titanu (TiO_2) a další. Oxidové keramické matrice se využívají pro svou vysokou odolnost vůči vysokým teplotám a chemickým látkám.
- Non-oxidové keramiky: Do této skupiny patří například karbidy (karbid křemíku – SiC) a nitridy (hliníkový nitrid – AlN). K hlavním vlastnostem těchto materiálů řadíme jejich výjimečné mechanické vlastnosti a výbornou odolnost vůči abrazi. [15]

1.3.3 Kovová matrice

Kovové matricové kompozitu uznáváme jako široce pokročilé materiály. U těchto matic tvoří základ kovy, které mohou být využívány ve formách, včetně slitin nebo čistých kovů. Kovové matrice bývají lepší než konvenční materiály, pokud jde o vylepšené mechanické a tepelné vlastnosti, které zahrnují dobrou odolnost proti opotřebení a výjimečnou tepelnou vodivost. V současnosti řadíme k běžným matricovým kovům hliník, měď, železo, hořčík, nikl a titan. Každý z nich se využívá na určitou vhodnou aplikaci. V poslední době se provádí výzkumy na využití kovových matic v průmyslových aplikacích, které by mohly nahradit běžně používané drahé slitiny. [16], [17]

Hlavní kategorie kovových matic v kompozitních materiálech:

- Slitiny: Použitím slitin, jedná se o směsi dvou a více kovů, se umožňuje dosáhnout specifických vlastností, v podobě získání pevnosti, odolnosti vůči korozi a teplotní stabilitě. Příkladem kovových matic v kompozitech mohou být například hliníkové slitiny, titanové slitiny a slitiny na bázi niklu.
- Čisté kovy: Čisté kovy se v kompozitech používají v případě vyžadovaných specifických vlastnostech konkrétního kovu. Takové matrice mohou být vyrobeny například z čistého hliníku, mědi nebo titanu.
- Kombinované formy: Kompozity mohou také kombinovat kovovou matici s jinými materiály, v podobě polymerů nebo keramika, a tak vytvářet kompozity s hybridními vlastnostmi. [15]

2 POLYMERNÍ KOMPOZITY

S kompozity s polymerní maticí se setkáváme nejběžněji, jelikož spojují vlastnosti polymerních matic současně s pevností a nízkou hmotností vláken. Využívá se od nábytkářství až po neobvyklé aplikace ve vesmírném průmyslu. Tato neustále se rozvíjející skupina materiálů nabízí širokou škálu vlastností, činící ji atraktivní pro mnoho průmyslových odvětví. Své místo nalézají od automobilového průmyslu až po letecký průmysl, kde se klade důraz na malou hmotnost, vysokou pevnost a odolnost vůči korozím. [15]

2.1 Výběr matrice

Výběrem správné matrice určené pro kompozitní materiály si zajistíme následně materiál s požadovanými specifickými vlastnostmi. Matrice může být polymerní, kovová, keramická. U každého typu nalezneme rozdílné vlastnosti a výhody.

Zvolení polymerní matrice pro kompozitní materiály může hrát zásadní roli v dosahování ideálních vlastností a výkonu výsledného kompozitu. Polymerické matrice se nejčastěji používají pro jejich schopnost poskytovat lehkost, zpracovatelnost a dobrou možnost formování do různých tvarů. Do polymerních matic zahrnujeme termosetové polymery, které se po ztuhnutí stávají pevnými a termoplastické polymery, uchovávající si svou tvarovatelnost i po opětovném zahřátí a ochlazení. [15]

2.1.1 Termoplastické matrice

Termoplastické matrice v současnosti představují důležitý prvek v oblasti kompozitních materiálů, protože jejich využití nacházíme v mnoha průmyslových odvětvích. Tyto matrice řadíme mezi termoplastické polymery, které pro svoji jedinečnou vlastnost nám umožňují opakované zpracování. Termoplastické matrice bývají ve formě lineárních řetězců, které mohou být transformovány v roztaveném stavu. Ve většině výrobních procesů se termoplastické matrice zahřívají, poté se formují lisováním, vstřikováním, vytlačováním nebo tvarováním za tepla, před ochlazením, aby si hotový produkt zachoval svůj tvar. Tato operace je vratná. Neoxidují, mají vysokou odolnost proti korozi a bývají vynikajícími tepelnými a elektrickými izolanty. V dnešní době termoplastické matrice představují nezbytnou roli v inovaci materiálového inženýrství. Samotný jejich vývoj ukazuje nové možnosti pro výrobu lehčích, pevnějších i ekologičtějších kompozitních materiálů. [15]

Několik vhodných termoplastů k použití matrice:

- **Polyamidy** – má dobré mechanické vlastnosti, odolnost proti tření a dobré chování při požáru. Jejich teplotní odolnost se výrazně zvyšuje přítomností skelných vláken.
- **Polyetheretherketon** – jde o termoplastický polymer a vysoce výkonný polymer, široce používán v medicíně, elektronice, telekomunikaci a leteckém průmyslu. Má velmi vysokou tepelnou odolnost ve spojení se skleněnými vlákny, které tento materiál charakterizují. PEEK prokázal vynikající mechanické vlastnosti a vysokou chemickou odolnost.
- **Polyetherketonketon** – termoplastický materiál a v současné době se dále zkoumá. Využití by našel v leteckém průmyslu jako matrice pro strukturní kompozity vyztužené uhlíkovými vlákny. PEKK materiál s vyšším výkonem, vykazuje vynikající tepelné vlastnosti při vyšších teplotách a dobrou odolnost vůči nárazu. [18]

2.1.2 Reaktoplastické matrice

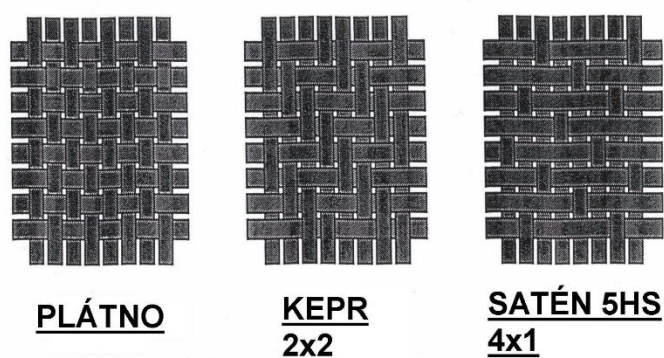
Reaktoplasty nazýváme zesíťované polymery vytvářející prostorovou trojrozměrnou síť. Obecně zůstávají kapalné při pokojové teplotě, během své realizace tuhnou vlivem tepla a přísady zvané tužidlo. Jejich transformace nastane vařením, jedná se o chemickou modifikaci spočívající ve velmi silné vazbě mezi molekulami ve třech rozměrech. Tento proces se stává nevratný a takto upravený materiál již zůstane netavitelným a nerozpustným ve většině rozpouštědel. Obecně bývá tužší než termoplastické matrice, lépe odolávají tečení a mohou být vhodné pro lisování velkých dílů s krátkými, dlouhými nebo tkanými vlákny. Reaktoplasty můžeme rozdělit na fenoplasty, aminoplasty, epoxidové pryskyřice, polyesterové pryskyřice a polyuretany. [19]

- **Epoxidové pryskyřice** – se obvykle používá v kontextu kompozitních materiálů, konkrétně v oblasti epoxidových pryskyřic. Epoxidové pryskyřice jsou polymerní materiály, které se používají jako matrice nebo pojivo v kompozitních materiálech. Tyto materiály jsou tvořeny kombinací epoxidových pryskyřic a vláken (často skelných nebo uhlíkových), což vytváří pevný a lehký materiál s vynikajícími mechanickými vlastnostmi. Vyniká především v kompozitech vysokou pevností a tuhostí, chemickou odolností, dobrou adhezí a nízkou smrštitivostí. [19]

- Fenolické pryskyřice – jsou dalším typem polymerů používaných jako matrice nebo pojivo v kompozitních materiálech. Fenolické pryskyřice jsou odvozeny z fenolu (karbolské kyseliny) a formaldehydu. Vynikají především dobrou tepelnou a elektrickou izolací, vysokou tvrdostí a pevností, nízkou smrštitivostí a odolností vůči chemikáliím. [19]

2.2 Výběr tkaniny

Pro volbu tkaniny matrice kompozitu musíme zvážit několik faktorů, včetně požadovaných mechanických vlastností, odolnosti vůči prostředí, teplotní stability a nákladů. Existuje mnoho typů tkanin například skelněná, uhlíková, aramidových (například Kevlar), či hybridní tkaniny kombinujících různé druhy vláken. U každého typu nacházíme vlastnosti, mezi které patří pevnost, tuhost, hmotnost a odolnost vůči chemikáliím. Skelné vlákna bývají často levnější, ale u uhlíkových vláken získáme vyšší pevnost a tuhost. Váha a hustota tkaniny ovlivňují celkovou hmotnost a hustotu kompozitu. Některé tkaniny mají vlákna orientovaná ve specifických směrech, proto tak může být dosaženo optimálních mechanických vlastností. Skelná vlákna bývají odolnější vůči chemikáliím oproti uhlíkovým vláknům. Uhlíková vlákna zase zajišťují větší teplotní stabilitu než skelná vlákna. Náklady na tkaninu bývají neméně důležitým faktorem v rozhodování při výběru. Skelná vlákna jsou cenově přijatelnější než uhlíková či aramidová vlákna. [20]



Obrázek 5 Typy tkanin [21]

2.3 Prepreg

Prepreg, jedná se zkratku pro "pre-impregnated" a označuje kompozitní materiál, ve kterém bývají vlákna impregnována pryskyřicí nebo polymerovou matricí předtím, než byl materiál předán k další zpracování. Takový proces nasycení musí být prováděn ve výrobě za daných podmínek, zajišťujících optimální distribuci a množství dané pryskyřice do kompozitu.

Výroba prepregů umožňuje potřebnou kontrolu množství pryskyřice v jednotlivém vlákně. Další předností nacházíme ve snadném uskladnění a manipulaci, jelikož bývají dodávány v roli nebo listech a jejich uložení probíhá v chladničkách nebo mrazících komorách. Při výrobě předem impregnovaného materiálu dochází k snížení času při samotném zpracování. Pokud chceme dosáhnout optimálních mechanických vlastností, musíme se pečlivě věnovat procesu impregnace.

Využití prepregů umožňuje výrobcům vytvářet kompozitní díly s perfektními mechanickými vlastnostmi a přesnou kontrolou složení materiálu. Prepregy nacházejí své využití v leteckém, automobilovém průmyslu, v lodním a sportovním vybavení, ale i v mnoha dalších odvětvích, požadující specifické materiály. [22], [23]

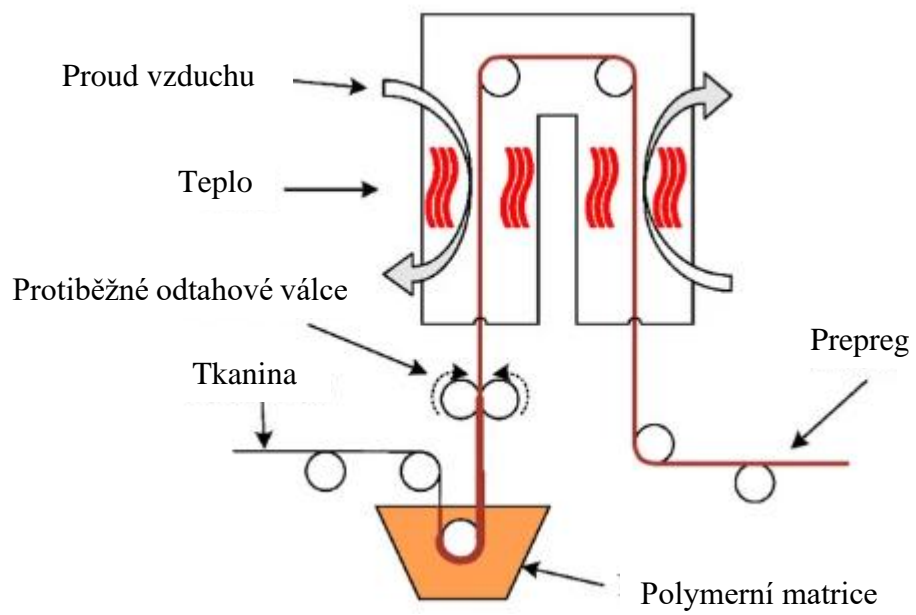
3 VÝROBA PREPREGU

Výroba prepregu se označuje jako proces, kdy vlákna impregnujeme pryskyřicí nebo polymerovou matricí, před samotným započítím výroby kompozitních dílů. Tento proces zabezpečuje rovnoměrné a přesné rozložení pryskyřice na vlákna a umožňuje kontrolu množství pryskyřice v kompozitu.

Postup výroby prepregu:

- Příprava vláken: Vlákna pevné fáze musejí projít pečlivým výběrem a připravit se pro impregnaci. Mohou být ve formě rohoží, tkanin, jednotlivých vláken. Vše se odvíjí od požadované struktury kompozitu.
- Příprava pryskyřice: Pryskyřice nebo polymerová matrice bývá přesně vybrána a připravena. Pryskyřice by měla být v tekutém či skoro tekutém stavu, aby se docílilo dostatečného proniknutí mezi jednotlivá vlákna a mohl se tak vytvořit homogenní materiál.
- Impregnace: Ponoření vláken do pryskyřice probíhá tak, aby bylo každé vlákno rovnoměrně pokryto pryskyřicí. Tento proces může být proveden několika způsoby. Jedním z nich bývá koupání vláken v pryskyřici, dalším procesem se nanáší pryskyřice na vlákna během průchodu pryskyřice mezi válci.
- Odstranění přebytečné pryskyřice: Pro zabránění přílišného nasycení a zachování požadované hmotnosti pryskyřice, se přebytečná pryskyřice odstraňuje. Toto může být prováděno stlačením a odstřed'ováním materiálu.
- Zpracování a sušení: Po impregnaci musejí být vlákna vytvarována do vyžadovaného tvaru. Poté se materiál daným způsobem suší, tak aby byla odstraněna z něho vlhkost a zajištěna jeho stabilita při skladování.
- Balení: Prepregy balíme tak, aby byly ochráněny před kontaminací a udržovaly se ve stabilních podmínkách, často bývají v chladničkách nebo mrazících komorách.

Prepregy se následně posílají k dalšímu zpracování nebo skladování pro pozdější využití. Během výroby prepregu musíme nezbytně kontrolovat a uchovávat specifické parametry, ke kterým patří teplota, tlak a čas, čímž dosahujeme požadovaných mechanických vlastností kompozitu. [22], [24]



Obrázek 6 Schéma výroby prepregu [25]

4 VLASTNOSTI

Vlastnosti prepregu se stávají klíčovými faktory ovlivňujícími výsledné vlastnosti kompozitního materiálu. Tyto vlastnosti závisí na typu vláken, zvolené pryskyřici a procesu výroby. [23]

4.1 Mechanické vlastnosti

Mechanické vlastnosti prepregu patří k nezastupitelným faktorům při našem rozhodování o jeho využití v konkrétních procesech. Samotné vlastnosti bývají předurčeny nejen samotnými vlákny pevné fáze, ale i pryskyřicí nebo polymerovou matricí, použitou při samotném impregnování.

Hlavní mechanické vlastnosti hodnotící se u prepregů:

- **Pevnost:** Tahová pevnost: Tato vlastnost nám udává, jak velký tahový tlak materiál vydrží, než dojde k jeho lámání. Pevnost prepregu odvisí na samotné pevnosti vláken a též na adhezi mezi vlákny a pryskyřicí.
- **Tuhost:** Modul pružnosti: Měří, odolnost materiálu vůči deformaci pod tahem. Čím vyšší hodnota modulu pružnosti, tím vyšší tuhost materiálu.
- **Duktilita:** Procento prodloužení při lámání: Ukazuje o kolik lze materiál prodloužit před jeho lámáním. U některých procesů může být duktilita rozhodující.
- **Únavová odolnost:** Únavová životnost: Měří, jakou dobu vydrží materiál vystavený cyklickému zatížení, než nastanou trvalé deformace nebo lámání.
- **Tepelné vlastnosti:** Teplotní odolnost: Jedná se o danou schopnost materiálu vzdorovat vysokým teplotám, aniž by docházelo ke ztrátám mechanických vlastností. Teplotní roztažnost: Ukazuje, jak se materiál rozpíná nebo smršťuje, když dochází k vystavení změnám teploty.
- **Chemická odolnost:** Odpornost proti chemikáliím: Vlastnost ukazuje odolávání působení nejrůznějších chemikálií bez samotné ztráty pevnosti a integrity materiálu.
- **Hustota:** Hmotnost na jednotkový objem: Ovlivňuje celkovou hmotnost kompozitního dílu.

- Adheze s povrchem: Adhezní pevnost: Jedná se o vlastnost přilnout k danému povrchu či dokonce k jinému kompozitním vrstvám.
- Zpracovatelnost: Viskozita pryskyřice: Tato schopnost ovlivňuje nasycení vláken a zpracovatelnost prepregu během celého výrobního procesu. [24], [26]

Na hodnoty jednotlivých vlastností mohou mít vliv řady faktorů, včetně zvolených materiálů, výrobních procesů, směr vláken a dalších. Pro výběr prepregu zohledňujeme konkrétní požadavky na proces a specifické mechanické vlastnosti. [24], [27]

4.2 Chemické vlastnosti

Chemické vlastnosti prepregu závisí na složení pryskyřice, polymerové matrice použité při impregnaci vláken.

Hlavních chemické vlastnosti:

- Odpornost proti chemikáliím: Schopnost odolávat vlivu chemikálií bez ztráty pevnosti nebo integrity materiálu. Odpornost vůči chemikáliím bývá závislá na daných vlastnostech pryskyřice a polymerní matrice.
- Chemická stabilita: Jedná se o schopnost uchovat svoji strukturu a vlastnosti při vystavení chemickým látkám. U některých prepregů nacházíme možnost citlivosti na určité chemikálie, a to omezuje jejich využití v některých prostředích.
- Odpornost vůči rozpouštědlům: Určité prepregy mohou být citlivé na některá rozpouštědla, která pak mění jejich vlastnosti či schopnosti uchovat si integritu materiálu.
- Hydrolytická stabilita: Vlastnost odolávání působení vody a vlhkosti. Některé polymerní matrice mohou být náchylnější k degradaci vlivem vlhkosti.
- Oxidační stabilita: Jedná se o schopnost vydržet vlivu kyslíku nebo jiných oxidačních látek, jelikož může docházet při jejich působení ke změně stability materiálu.
- Reaktivita: Reaktivita prepregu s jinými materiály či prostředím může být nezbytná pro některé procesy.
- Teplotní odolnost: Schopnost odolávat vysokým teplotám, aniž by docházelo k degradaci anebo ztrátě mechanických vlastností, protože některé polymerní matrice mohou mít své specifické teplotní limity.

- Chemické změny během zpracování: V průběhu procesu při výrobě prepregu mohou nastat chemické změny, které změni konečné vlastnosti materiálu.

Chemické vlastnosti prepregu závisejí na konkrétních materiálech nacházejících se v pryskyřici, polymerové matici, a také na samotných podmínkách při výrobě. Pro zvolení by se mělo brát vždy v úvahu specifické chemické požadavky daného procesu a prostředí, kde se bude materiál používat. [24], [26], [28]

4.3 Vady ovlivňující vlastnosti

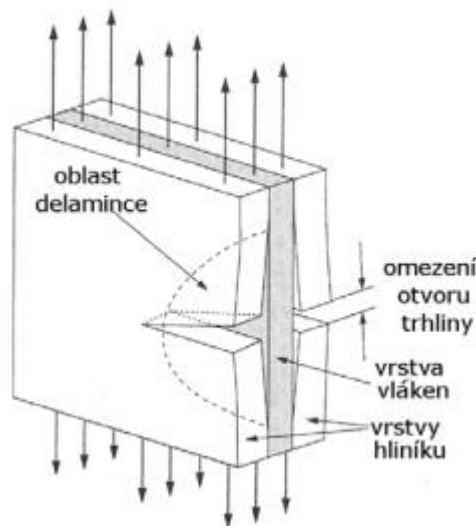
Výskyt vad v prepregu může mít negativní dopad na vlastnosti výsledného kompozitního materiálu.

Běžné vady, které mohou ovlivnit prepreg:

- Nedostatečná impregnace: Nedostatečná impregnace vláken pryskyřicí často vede k nerovnoměrnému nasycení pryskyřice v kompozitu. To může mít za následek snížení mechanické pevnosti a tuhosti materiálu.
- Přebytečná pryskyřice: Přebytečná pryskyřice může zvyšovat hmotnost kompozitního materiálu, ale také snížit jeho mechanické vlastnosti, především jeho pevnost.
- Vzduchové bubliny: Přítomnost vzduchových bublin v prepregu znamená možnost oslabení kompozitu a zvyšuje se riziko lámání a delaminace.
- Nerovnoměrná orientace vláken: Pokud bývají vlákna pevné fáze nepravidelně nebo nejednotně orientována, může nastat změna v mechanických vlastnostech kompozitního materiálu. Proto musí být správná orientace vláken, aby bylo dosaženo požadovaných vlastností.
- Kontaminace: Kontaminace prepregu cizími látkami, nečistotami snižuje adhezi mezi vlákny a pryskyřicí a opět dochází ke zhoršeným mechanickým vlastnostem materiálu.
- Vady v mikrostruktuře: Mikroskopické vady, ke kterým patří trhliny, nedostatečné spojení mezi vlákny a pryskyřicí, také negativně ovlivňují pevnost a odolnost materiálu.
- Nedostatečná sušení: Nedostatečné sušení prepregu přispívá k přítomnosti vlhkosti, což vede ke změnám mechanické vlastnosti a stability kompozitu.

- Nesprávná teplota nebo tlak během výroby: Nesprávně zvolená teplota a tlak v průběhu procesu výroby prepregu má za následek chyby v impregnaci a samotným změnám vlastnosti materiálu.
- Znečištění pryskyřice: Znečištění pryskyřice nečistotami, nevhodnými chemickými látkami vede k degradaci vlastností kompozitu.

Pro dosažení konzistentních a vysoce kvalitních výsledků u výroby kompozitních materiálů bývá nezbytné dbát na prevenci těchto možných vad. Dodržování předem stanovených postupů a pečlivá kontrola jednotlivých procesů vede k snížení na minimum výskytu těchto vad při výrobě prepregů. [29], [30]



Obrázek 7 Schéma vrstvení a delaminace vrstev [31]

5 VLIV VLKOSTI NA MECHANICKÉ VLASTNOSTI PREPREGU

Vliv vlhkosti na mechanické vlastnosti kompozitního materiálu může být značný. Vše závisí na konkrétním typu kompozitu, materiálu matrice a výztuže, podmínkách prostředí. Toto všechno rozhoduje o dopadu absorpce vody na kompozit. Citlivost na vlhkost nacházíme hlavně u kompozitu obsahujících polymerovou matici, skelná vlákna, uhlíková vlákna.

Vlhkost může zanechat nepříznivé změny v mechanických vlastnostech kompozitu (snížení pevnosti, zvýšení křehkosti, změny v mechanickém chování a rozměrů, zhoršení odolnosti vůči únavě).

Pro maximální snížení negativního dopadu vlhkosti na mechanické vlastnosti kompozitu, musí být přijaty vhodná opatření v podobě zvolení správné povrchové úpravy, využití hydrofobního materiálu nebo izolace od prostředí. Také se provádějí testy na vlhkost a pevnost kompozitních materiálů v prostředí, které simuluje reálné podmínky použití, čímž získáme potřebné znalosti o mechanických vlastnostech. [32]

5.1 Snížení pevnosti a tuhosti kompozitu

Snížení pevnosti a tuhosti kompozitních materiálů představuje významný aspekt, kterému musíme věnovat pečlivou pozornost v oblasti materiálového inženýrství. Kompozitech se nachází kombinace složek představující vlákna a matrice. Ty se široce využívají v mnoha odvětvích průmyslu pro své vynikajícím mechanické vlastnosti. Avšak různé faktory mohou přispět k jejich snížení pevnosti a tuhosti, čímž zásadním způsobem dochází k možným změnám v jejich výkonnost a spolehlivost. [26]

Jedním z negativních faktorů vedoucí ke snížení pevnosti a tuhosti se stává přítomnost vlhkosti. Absorpce vody může být významná ve svém vlivu na požadované mechanické vlastnosti kompozitu zejména u polymerního kompozitu, kde nacházíme vlákna (skelná vlákna, uhlíková) a polymerové matrice. Z okolí může docházet k pronikání vlhkosti do polymerové matrice kompozitu, kdy se voda dostane do mezimolekulárních mezí a začne rozvolňovat strukturu polymeru, což má za následek snížení pevnosti. [26]

Vlhkost může pronikat do matrice a vláken několika způsoby:

- Difúze: Vlhkost může pronikat do polymerové matrice za pomoci difúze přes pryskyřičné matrice a do vláken skrz mezimolekulární mezery a struktury ve vláknech. To závisí na materiálových vlastnostech použité pryskyřice a taktéž na konkrétních podmínkách prostředí (relativní vlhkost a teplota). Poloměr difúze se může lišit dle různých typů pryskyřic.
- Kapilární působení: Tato síla může přitahovat vlhkost do mezimolekulárních prostor v matrici i samotných vláken. Tato situace může nastat především u materiálů s otevřenou strukturou, kdy kapilární síly mají schopnost tahat vodu či jinou vlhkost do svých vnitřních prostor materiálu.
- Porozita: Přítomnost pórů a mikrotrhlin ve struktuře kompozitu usnadňuje pronikání vlhkosti. Voda proniká skrz tyto otvory a ovlivňuje vlastnosti materiálu. [26]

Vlákna v kompozitu se vkládají ve většině případů do matrice takovým způsobem, aby tvořila pevnou strukturu. Vlhkost však oslabuje adhezi mezi vlákny a matricí a dochází k snížení účinnosti přenosu zatížení mezi jednotlivými fázemi.

Hydrolytický rozklad polymerů může způsobit opět vlhkost, čímž nastane ztráta molekulární hmotnosti a následně i snížení pevnosti a tuhosti. Voda může způsobit hydrolyzu polymerů v matrici (pryskyřici), které může vést ke změnám v její chemické struktuře a následně tak ovlivnit adhezi mezi matricí a vlákny, jelikož změny v povrchové chemii mohou změnit schopnost matrice přilnout k vláknům.

Při ovlivnění mezifázových interakcí vlhkostí může být pozorován vliv na mezifázové interakce mezi vlákny a matricí. Toto může vést k oslabení mechanických vlastností.

Vlhkost může také způsobovat změny v mikrostruktuře kompozitu, a to včetně otoků nebo smršťování. Tyto změny vedou ke změně celkových mechanických vlastností.

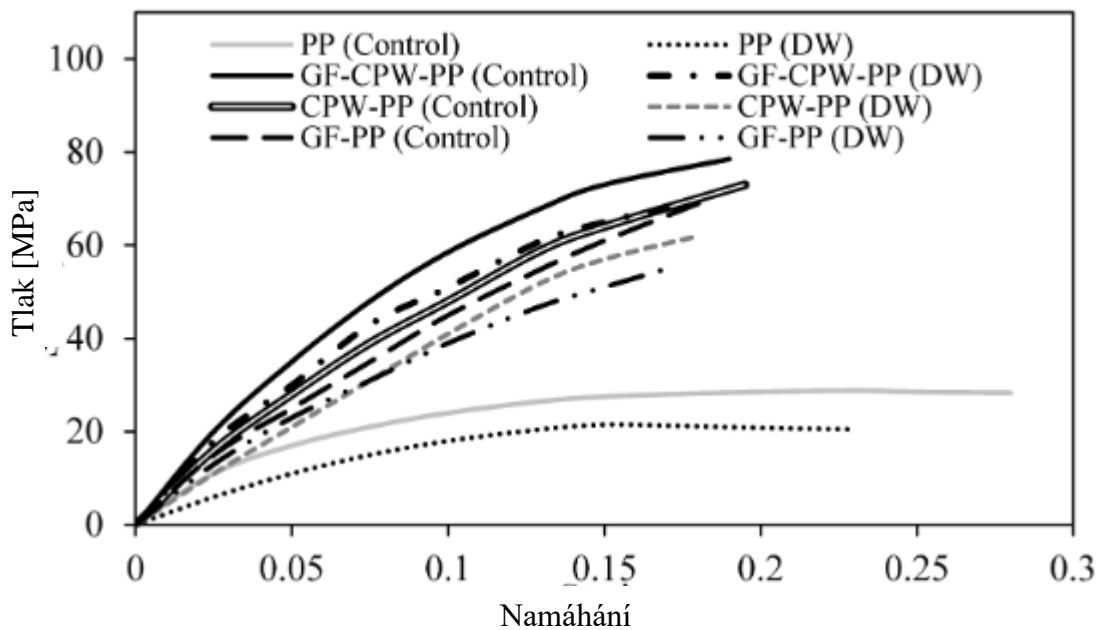
Pro maximální snížení negativních dopadů vlhkosti na vlákna a matrici kompozitu musíme dodržovat postupy při výrobě, skladování a používání kompozitních materiálů.

[33]

Základní postupy:

- **Správná impregnace a polymerizace:** Při výrobě kompozitu musíme zajistit, aby vlákna byla správně impregnována pryskyřicí. Správně provedená impregnace zabraňuje vniku vzduchu a vlhkosti do kompozitu. Taktéž se pečlivě zaměřujeme na to, jak co nejlépe polymerizovat pryskyřici, aby dosáhla optimálních mechanických vlastností a odolnosti proti vlhkosti.
- **Ochranné povlaky:** Používáním ochranných povlaků na povrchu kompozitních materiálů docílíme minimálního pronikání vlhkosti. Takové povlaky mohou být odpudivé vůči vodě a tím snižovat schopnost vlákna a matrice absorbovat vlhkost.
- **Skladování v suchém prostředí:** Kompozitní materiály by měly být vždy uskladněny v suchém prostředí, protože vlhkost ve vzduchu může být následně absorbována materiálem, pokud není správně uložen. Skladováním v uzavřených prostorách a používání suchých skladovacích místností může minimalizovat vstup vlhkosti.
- **Vakuové balení:** Balení kompozitu s využitím vakua může pomoci odstranit vzduch a minimalizovat vstup vlhkosti. Vakuové balení nám vytvoří uzavřený prostor okolo kompozitu, což zabraňuje vnějšímu prostředí, aby ovlivnilo materiál.
- **Povrchová úprava:** Některé povrchové úpravy a nátěry aplikovány na povrch kompozitního materiálu, snižují schopnost absorbovat vlhkost a zlepšit odolnost proti vnějším vlivům.
- **Monitorování a údržba:** Pravidelné monitorování stavu kompozitního materiálu a provedení potřebných oprav pomáhá minimalizovat negativní dopady vlhkosti včas.

Veškeré tyto postupy by měly být prováděny v souladu s doporučeními výrobců a specifikacemi konkrétních kompozitních materiálů, aby bylo dosaženo optimálních výsledků a dlouhodobé odolnosti materiálu proti vlivům vlhkosti. [34]



Obrázek 8 Příklad grafu, jak se liší namáhání s a bez absorpce [35]

5.2 Rozměrové změny kompozitu

Rozměrové změny kompozitních materiálů vlivem vlhkosti mohou být důležitým faktorem pro svůj nepříznivý dopad na jejich chování a vlastnosti. Vlhkost může způsobit vstřebání vody kompozitních materiálů a vést k fyzikálním a chemickým změnám v jejich struktuře. Vstřebávání vody způsobuje velké rozměrové změny, jako bývá bobtnání nebo expanze kompozitního materiálu. Nastává deformace a změny tvaru, což má dopad na celkovou strukturální integritu kompozitu. Pokud se objeví takové rozsáhlé změny, mohou být kritické, především u průmyslových a technologických aplikací, kdy se požaduje přesnost a stabilita rozměrů. Kompozitní materiály s obsahem organické matrice, bývají obzvláště náchylné k absorpci vlhkosti. Vláknové materiály v podobě skelných vláken nebo uhlíkových vláken se též mohou interagovat s vodou a měnit své fyzikální vlastnosti. Takový proces absorpce může být dynamický a závislý na mnoha dalších faktorech například čase, teplotě a vlhkosti okolí. Když materiál nasaje vodou, vidíme změnu v objemu, což vede k otokům či hydroexpanzi. Toto bývá důležité především pro polymerní kompozity, kde vlákna obklopuje polymerní matrice. Naproti tomu při odpařování nebo odvádění vody dochází k smršťování, které objem snižuje. Takové cykly otoků a smršťování bývají příčinou opakovaných změn v rozměru.

Vlákna v kompozitu mívají svou vlastní hygroexpansi. Příkladem bývá reakce skelného vlákna na vlhkost, která tak ovlivňuje rozměrové chování kompozitu.

Další rozměrové změny mohou být způsobeny teplotním chováním kompozitu na vlhkost.

Ke snížení nepříznivých vlivů vlhkosti na kompozity musíme dbát při výrobě na sušení materiálu a udržování vhodné vlhkosti u zpracování. Vhodná konstrukce kompozitních dílů a laminátů také zamezuje rozměrovým změnám. [35]

5.3 Degradace materiálu matrice

U některých matricových materiálů nalézáme větší náchylnost k degradaci v přítomnosti vody. Voda proniká do struktury polymerů může způsobovat různé chemické a fyzikální změny.

Vlhkost může způsobit hydrolytický rozklad polymeru. Jedná se o chemický proces, kdy dochází ke štěpení molekul polymeru za účasti vody. Následkem bývá ztráta molekulární hmotnosti a pevnosti polymeru.

Absorpce vlhkosti může způsobit otoky v polymerní struktuře vedoucí k fyzikálním změnám v samotné mikrostruktuře materiálu. Následkem toho nastanou změny v mechanických vlastnostech (pevnosti, tuhosti).

Vlhkost způsobuje také změny teplotního chování polymeru, což přispívá k degradaci materiálu.

K dalším vlivům vlhkosti na degradaci patří oslabení mezifázových interakcí a změny v chemické stabilitě. [36]

5.4 Snížená odolnost proti únavě

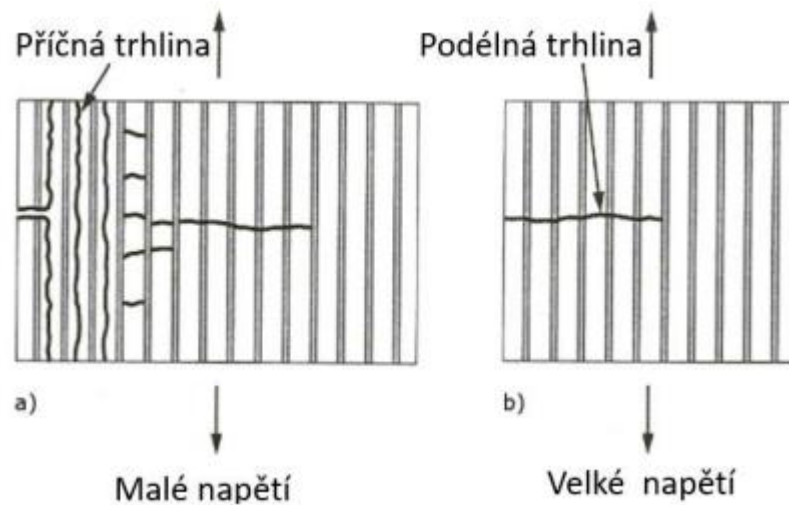
Přítomnost vody snižuje odolnost proti únavě v kompozitech, podporou růstu mikrotrhlin nebo může vyvolat jiné mechanismy poškození. Na toto je třeba dbát především tam, kde se materiál vystavuje cyklickému zatížení.

Absorpce vody vede k oslabení mezifázových interakcí a snížení pevnosti vláken.

Oslabení mezifázových interakcí snižuje adhezi mezi vlákny a matricí. Toto snižuje schopnost materiálu vzdorovat cyklickým zatížením.

Vlhkost bývá také příčinou, že polymery v matrici kompozitu jsou křehčí, což opět vede ke snížení schopnosti materiálu vstřebávat energii při cyklickém zatížení.

U některých polymerů může mít vlhkost za následek hydrolytický rozklad, kdy voda proniká do polymerové matrice zapříčiní rozpad molekul polymeru. [33]



Obrázek 9 Únava MMC kompozitu s vlákny a) vysokocyklová b) nízkocyklová [31]

5.5 Elektrické a tepelné vlastnosti prepregu

Vliv vlhkosti na elektrické a tepelné vlastnosti kompozitu může být významný, zejména v případě polymerních kompozitu. Přítomnost vody by zvyšovala vodivost materiálu, což by bylo v některých aplikacích nežádoucí.

Vlákna a matrice kompozitu mohou být citlivé na vlhkost a dochází k změně elektrické vodivosti materiálu. Především polymery mohou vstřebávat vlhkost, a tak zvyšovat jejich vodivost.

Vlhkost dále může zvýšit dielektrickou konstantu polymerové matrice ovlivňující elektrické izolační vlastnosti materiálu.

Voda má rozličné tepelné vlastnosti než většina polymerů, a tím může ovlivnit celkovou tepelnou vodivost materiálu.

Absorpce vody může měnit teplotní roztažnost materiálu a jeho tepelné chování při rozdílných teplotách. [37]

5.6 Interfaciální lepení

Adheze mezi samotnou matricí a výztuží bývá rozhodující pro celkový výkon kompozitu. Vláknové kompozity, které zahrnují fáze vláken a matrice závisí na interakci mezi těmito dvěma fázemi. Tato mezifázová adheze hraje svou nezastupitelnou úlohu v mechanických vlastnostech a celkovém chování kompozitu. Vlhkost může ovlivnit interfaciální lepení několika způsoby.

Polymerová matrice v kompozitu při absorbování vlhkosti způsobí možnou změnu rozhraní mezi matricí a vlákny. Vlákná také mohou absorbovat vlhkost, a tím dochází k proměně jejich povrchových vlastností. Další změny způsobeny vstřebáním vody bývají otoky a změny v mikrostrukturu materiálu.

Oslabení adheze: Vlhkost může oslabit adhezi mezi vlákny a matricí. To může být způsobeno změnami v povrchové struktuře vláken, přítomností vody na rozhraní nebo změnami chemických vlastností polymerové matrice.

Hydrolytický rozklad: V případě organických polymerů může vlhkost přispět k hydrolytickému rozkladu, a to způsobí štěpení chemických vazeb na rozhraní matrice a vláken.

Změny v mechanických vlastnostech: Vlákná a matrice bývají navzájem spojeny za pomoci mezifázové adheze. Vlivem vlhkosti však může nastat oslabení mezifázové adheze a následkem toho dojde k snížení mechanických vlastností kompozitu v podobě jako tahová pevnost nebo tuhost. [38]

5.7 Růst hub a plísní

- Někdy absorpce vody vytváří příznivé prostředí pro růst plísní a hub, a to by vedlo ke snížení mechanických vlastností kompozitního materiálu.
- Vliv vlhkosti na růst plísní a hub v kompozitech, především v organických matricích, může být značný. Vlhkost vytváří prostředí, které vyhovuje mikrobiálnímu růstu, hlavně plísním a houbám.
- Některé aspekty, které mohou být ovlivněny:
- Absorpce vody: Polymerová matrice kompozitu může absorbovat vlhkost a vytvářet vhodné podmínky pro růst plísní a hub. Zejména organická vlákna, mohou poskytovat prostředí pro mikroorganismy.

- **Odpadní látky:** Organický materiál v kompozitu, hlavně v matrici, může být živnou půdou pro mikroorganismy. Tyto mikroorganismy využívají organické látky jako svůj zdroj živin a tím způsobit biologický rozklad materiálu.
- **Změny v mikrostruktuře:** Růst plísní a hub může nastartovat změny v mikrostruktuře kompozitu v podobě tvoření mikrotrhlin a změn v mechanických vlastnostech. (39)

Pro snížení či zamezení růstu plísní a hub v kompozitech můžeme provést tyto opatření:

- **Používání neorganických materiálů:** Zvolení neorganických materiálů pro matrici a vlákna sníží podmínky pro růst mikroorganismů, jelikož nevytvoříme vhodný zdroj živin.
- **Antimikrobiální úpravy:** Použití antimikrobiálních látek nebo úprav na povrchu kompozitu může zamezit růstu mikroorganismů.
- **Vhodné skladování a prostředí:** Pokud docílíme uchování kompozitních materiálů v suchém prostředí můžeme předejít růstu plísní a hub.
- **Pravidelná kontrola a čištění:** Pravidelná kontrola kompozitu a odstranění vlhkosti také výrazně zabraňují či alespoň minimalizují růstu plísní a hub. [40]

6 ZMĚNA MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ PREPREGU V AGRESIVNÍM PROSTŘEDÍ

6.1 Uhlíkový prepreg

Změny polymerních kompozitů v různých prostředích jsou ovlivněny vzájemnou chemickou reaktivitou polymerní matrice s okolním prostředím a rychlostí difúze. Difúze může nastat jako fyzikální proces, při kterém se makromolekuly oddalují difundující látkou a polymer vlivem měknutí tekutiny bobtná a stává se méně tuhým, což může vést k prasklinám na rozhraní matrice/výztuže. Vznik trhlin může způsobit narušení spojení vláken a tím umožnit vstup různých agresivních kapalin způsobujících degradaci materiálu. Navzdory vysoké stabilitě mohou kompozity s polymerní matricí podléhat degradaci při dlouhodobém vystavení agresivnímu prostředí. Vliv chemikálií na degradaci kompozitů se může projevit snížením mechanických vlastností a změnou hmotnosti nebo vzhledu. Pevnost v ohybu v této práci od Amara klesla po 36 dnech o 22 % po expozici 10 % NaOH a o 16 % po expozici 10 % HCl. Modul v ohybu se snížil o 27 % po působení 10 % NaOH a o 22 % po expozici 10 % HCl. Drsnost se zvyšovala s dobou expozice a byla vyšší u vzorků ponořených do alkalického roztoku. V jiném výzkumu od Amara se zkoumal vliv 10 % HCl a 10 % H₂SO₄ na ohybové vlastnosti kompozitů CFRP a zjistilo se, že pevnost v ohybu se po expozici HCl snížila o 16 %, což je rozdílný výsledek, který mohl být ovlivněn uspořádáním vláknů, a po expozici vodnému roztoku H₂SO₄ o 11 %. V různých pracích se zkoumalo spoustu rozdílných koncentrací a vlastností kompozitu,

Nelze jednoznačně říci, že vlivem alkalického prostředí dochází k vyššímu poklesu mechanických vlastností oproti kyselému prostředí, jak bylo pozorováno v různých pracích. Vliv prostředí hluboce závisí na použité koncentraci kyseliny nebo zásady. Při srovnání stejné koncentrace kyselého a zásaditého byl však pozorován vyšší pokles vlastností materiálu po expozici alkalickému prostředí.

Ve srovnání s polyestery má epoxidová pryskyřice lepší mechanické vlastnosti a vyšší odolnost proti vlhkosti. Přesto epoxidová pryskyřice vykazuje pokles mechanických vlastností vlivem aplikované vlhkosti. [41], [42], [43]

6.2 Skelný prepreg

V studovaných pracích byl kompozit zkomán vůči vlivu na pevnost v ohybu, tvrdost a rázovou houževnatost kompozitů z polymeru vyztuženého skleněnými vlákny. Bylo zjištěno, že pevnost v ohybu se během 30 dnů po ponoření do 20 % vodného roztoku HCl nezměnila a po této době bylo pozorováno 10 % pokles pevnosti v ohybu. Pokud jde o tvrdost, bylo prokázáno, že po 90 dnech expozice se tvrdost snížila přibližně o 15 %.

Míra slanosti v mořích se pohybuje mezi 3,1-3,8 %. Za průměrnou hodnotu slanosti se považuje přibližně 3,5 %. To zvýšilo důležitost používání různých kompozitních materiálů ve slané mořské vodě v oblastech, jako jsou vrtné činnosti na moři, přenosové vedení pitné vody pod hladinou moře a činnosti při průzkumu ropy. Ve spodních částech mořské hladiny jsou kromě různých kapalin nebo plynů přepravovaných potrubím používaným v přenosových vedeních vnější povrchy pouze v kontaktu s mořskou vodou. Je známo, že polymerní kompozitní materiály jsou široce používány při skladování a přepravě vody. V předchozích studiích byli vzorky vystaveny ze sklo/epoxidových kompozitních trubek stárnutí v mořské vodě po dobu několika měsíců. Provedli nízkorychlostní nárazovou zkoušku na letité vzorky. V důsledku experimentů dospěli k závěru, že stárnutí v mořské vodě vliv na rázové charakteristiky a selhání kompozitních materiálů. V jiné studii se studoval vliv podmínek prostředí a poškození dopadem na únavovou životnost vnitřně natlakovaných trubek s epoxidovou maticí vyztužených skleněnými vlákny. V určitých časových obdobích vystavili potrubí mořské vodě. Zkoumali únavovou životnost trubek podle různých nárazových energií a doby zdržení v mořské vodě. Zjistilo se, že únavová životnost vzorků se snížila vlivem mořské vody. Poslední studie zkoumala vliv mořské vody na rázové chování kompozitních trubek vyztužených skelnými vlákny. Rázové testy byly aplikovány při různých energetických hladinách při okolní teplotě na potrubí uchovávané v mořské vodě. Použila se křivka kontaktní síly a údaje o absorbované energii v nárazových testech, aby prozkoumal účinek stárnutí. Zdůraznila se, že parametry absorbované vlhkosti, obsahu soli, velikosti trubky, maximální síly nárazu a energie nárazu ovlivňující poškození materiálu. [44], [45]

6.3 Hybridní prepreg (uhlík-aramid)

Po ponoření do solného roztoku nebyla zjištěna žádná degradace hřidelí, ale hřídele z uhlíkovo-aramidového kompozitu vykazovaly 20,8% úbytek hmotnosti po kyselém ponoření, na rozdíl od pouhých uhlíkových vláken, kde ztratily pouze 6,2 % hmotnosti. Obě hodnoty byly u epoxidu vytvrzeného RT a celkově si vedly nejhůře. Tento špatný výkon uhlík-aramidových hřidelí lze vysvětlit kyselinami vedoucími k hydrolyze epoxidu i aramidových vláken. Až 83,4% snížení tahových vlastností polymeru vyztuženého aramidovými vlákny po 288 hodinách ponoření do 30% koncentrace kyseliny sírové naznačuje, že zatímco redukce tahu byla pomalejší ve slané vodě, dochází k ní po delší době. Hřídele s hybridní výztuží se ukázaly být odolnější vůči mechanickému opotřebení poté, co bylo pozorováno zvýšení tvrdosti ve srovnání s uhlíkovými vlákny pouze z 12,0 % a 14,7 % u skleněných vláken a aramidových vláken, přičemž epoxidy vytvrzené RT vykazovaly nejvyšší tvrdost. Ukázalo se také, že byla odolnost aramidových vláken proti nárazu srovnávána s uhlíkovými vlákny a překračovala je, což bylo vysvětleno jako důsledek zvýšení tažnosti a roztažnosti v aramidových vláknech. A konečně, karbon-aramidová hřídel vykazovala největší úsporu hmotnosti ve výši 10 %. I když bylo zjištěno, že pouze karbonové hřídele mají vyšší hodnoty specifické pevnosti, lze doporučit použití těchto aramidových vláken v určitých aplikacích kvůli jejich celkové nižší hmotnosti a výrazněji jejich nižší ceně. [46]

7 MĚŘENÍ MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ

Hotový výrobek se na závěr změří, dle dané aplikace použitého kompozitu. Kompozit lze měřit za pomoci několika typů zkoušek: statická tahová, tlaková a ohybová zkouška.

7.1 Tahová zkouška

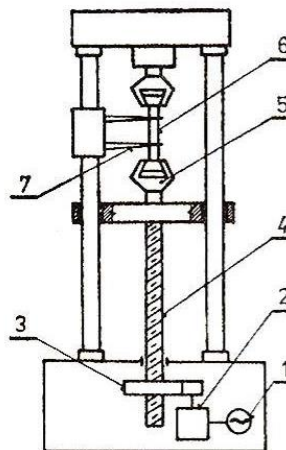
Zkouška tahem se počítá mezi základní mechanické zkušební metody a její využití nalezneme k hodnocení mechanických vlastností materiálů, především kovů, polymerů a kompozitu. Základním cílem tahových zkoušek bývá určit, jak materiál reaguje na axiální síly, hlavně natahování nebo tažení. Tento test umožňuje vědcům pochopit vlastnosti, jako mezi něž patří pevnost, elasticita, tažnost a houževnatost. [47]

Přehled procesu zkoušky tahem:

- Příprava vzorku: Daný vzorek materiálu musí být připraven se standardizovanými rozměry, typicky ve formě válcového nebo plochého vzorku. Velmi často bývá zpracovaný dle specifických norem zajišťujících konzistentnost pro testování.
- Montáž vzorku: Připravený vzorek se namontuje do testovacího stroje, který má na každém konci umístěny uchopovací zařízení, zajišťující bezpečné držení vzorku. Pro přesné získání výsledků testu musíme zabezpečit správné zarovnání vzorku.
- Použití síly: Zkušební stroj nám postupně aplikuje se zvyšující axiální zatížení nebo sílu na daný vzorek. Síla se aplikuje konstantní rychlostí, než nastane samotné zlomení vzorku.
- Data záznamu: Během zkoušky se zaznamenávají potřebné údaje, včetně vynaložené síly a odpovídající deformace či prodloužení vzorku. Tyto získané údaje se obvykle vykreslují na křivce napětí-deformace, kde napětí bývá aplikovaná síla dělená původní plochou průřezu a přetvoření bývá deformace dělená původní délkou.
- Analýza výsledků: Křivka napětí a deformace nám poskytuje důležité informace o chování materiálu v tahu. Mezi marginální parametry patří konečná pevnost v tahu, mez kluzu, modul pružnosti a prodloužení při přetržení. [48]

Inženýři využívají tyto získaná data k posouzení výkonnosti materiálu, při rozhodování o návrhu a zajištění součinnosti s průmyslovými standardy.

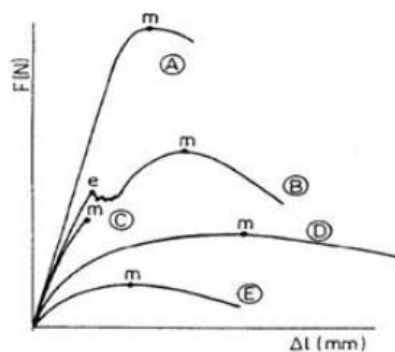
Testování tahem se používá při kontrole kvality, výzkumu materiálů a navrhování i výrobě nejrůznějších produktů, a to počínaje od konstrukčních součástí až po spotřební zboží. Informace poskytnuté z tahových zkoušek pomáhají pro volbu materiálů vhodných ke konkrétní aplikaci a navrhování struktury s požadovanými mechanickými vlastnostmi. [47]



Mechanický univerzální trhačí stroj

- 1 — elektromotor, 2 — převodovka,
- 3 — ozubené kolo s matičí,
- 4 — pohybový šroub, 5 — upínací hlava, 6 — zkušební těleso,
- 7 — snímač prodloužení zkušebního

Obrázek 10 Schéma tahového stroje [49]



- Pracovní diagram tahové zkoušky
- A — tvrdá ocel
 - B — měkká ocel
 - C — šedá litina
 - D - měď
 - E - hliník

Obrázek 11 Příklady tahového diagramu [50]

7.2 Tlaková zkouška

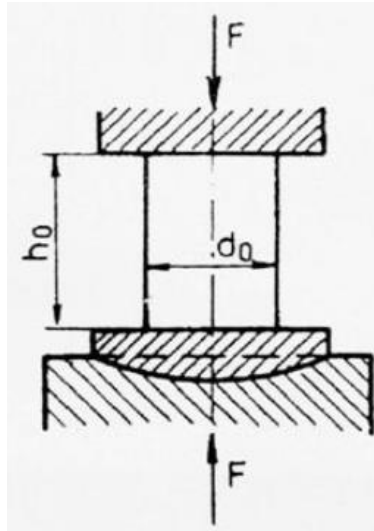
Mezi další důležitou mechanickou zkušební metodou řadíme tlakovou zkoušku, která doplňuje zkoušky tahem. Zatímco tahové zkoušky nám ukazují, jak materiál reaguje na síly působící v tahu (tah nebo natahování), tlakové zkoušky hodnotí samotné chování materiálu, pokud se vystaví silám v tlaku (tlačení nebo mačkání).

Přehled procesu kompresního testování:

- Příprava vzorku: Stejně jako u tahové zkoušky se připraví vzorek materiálu se standardizovanými rozměry. Tvar vzorku se může být rozlišný v závislosti na použitém materiálu a vybraných zkušebních normách. K běžným tvarům patří válce, krychle nebo hranoly.
- Montáž vzorku: Vzorek se umístí do zkušebního stroje mezi kompresní desky nebo přípravky. Opět správné zarovnání bývá zásadní pro zajištění přesných a spolehlivých výsledků.
- Použití síly: Zkušební stroj podává postupně zvyšující se axiální zatížení nebo sílu na vzorek ve směru, který jej stlačuje. Síla se aplikuje konstantní rychlostí, dokud se vzorek nedeformuje nebo nezlomí.
- Data záznamu: V průběhu zkoušky se zaznamenávají data, včetně vynaložené síly a odpovídající deformace nebo stlačení vzorku. Tyto data lze využít ke generování křivky napětí-deformace pro kompresi.
- Analýza výsledků: Křivka napětí-deformace získaná z tlakového testování nám poskytuje pohled na chování materiálu při stlačení.

Mezi hlavní ukazatele patří pevnost v tlaku, modul pružnosti v tlaku a deformační charakteristiky materiálu při zatížení tlakem.

Bez kompresivního testování se neobejdeme v různých průmyslových odvětvích, třeba jako stavebnictví, výrobě a vědě o materiálech. Pomáhá při výzkumu porozumět tomu, jak dané materiály vzdorují tlakovým silám, poskytuje cenné informace pro navrhování konstrukcí, optimalizaci materiálů pro konkrétní procesy a zajištění souladu s průmyslovými standardy. V některých případech mohou materiály vykazovat rozdílné chování při tlaku v porovnání s tahem a pro ucelené pochopení jeho mechanických vlastností se proto ukazují jako nezbytné zkoušky v tahu i tlaku. [48]



Obrázek 12 Schéma tlakové zkoušky [50]

7.3 Ohybová zkouška

Zkouška ohybem, známá také jako ohybová nebo příčná zkouška, hodnotí schopnost materiálu odolávat zatížení v ohybu. Tento typ testu se jeví zvláště důležitý pro materiály, které se používají ve strukturálních aplikacích pro kovy, polymery a kompozity. Zkouška ohybem pomáhá určit pevnost materiálu v ohybu, modul pružnosti a další důležité mechanické vlastnosti.

Přehled procesu zkoušky ohybem:

- Příprava vzorku: Vzorek bývá klasicky obdélníkový nebo válcový nosník standardizované velikosti se specifickými rozměry na základě zkušebních norem či požadavků. Vzorek mívá často uprostřed zářez nebo označení, aby se usnadnilo působení ohybového zatížení.
- Montáž vzorku: Vzorek má na svých koncích podporu tvořenou dvěma paralelními podpěrami, čímž vzniká jednoduchá konfigurace nosníku. Zatěžovací bod, který působí ohybovou silou, se často nachází ve středu nosníku.
- Zkušební zařízení: Ohybová zkouška obvykle provádíme za pomoci ohybového stroje umožňujícího nám přesné ovládání potřebného zatížení a měření deformací. Zařízení musí být vždy správně kalibrováno dle stanovených standardů.

- Použití síly: Zatížení se aplikuje kolmo k podélné ose vzorku ve středu, což způsobuje ohyb. Síla bývá aplikována postupně, dokud se vzorek nezlomí nebo nedosáhne předem stanovené úrovně deformace.
- Zatížení teplotou a vlhkostí: Občas při ohybových zkouškách dochází vystavení zkoumaného vzorku různým teplotám a zvýšené vlhkosti, aby se simulovaly různé provozní podmínky.
- Data záznamu: V průběhu zkoušky se zaznamenávají data, včetně použité síly a odpovídající deformace nebo posunutí vzorku. Tyto data se používají k výpočtu hlavních parametrů, mezi něž patří pevnost v ohybu, modul pružnosti v ohybu a deformační charakteristiky materiálu.
- Analýza výsledků: Zkouška ohybem poskytuje pohled na chování materiálu při ohybovém zatížení, pro nás jde o zásadní aplikace, kde se vyskytuje ohyb, jako běžná podmínka namáhání. [51]

Výsledky konstruktérům pomáhají pochopit, jak se materiály chovají v situacích, kdy musí být vystaveny ohybovým silám, což pomáhá při návrhu a výběru materiálu.

Zkoušky ohybem bývají velmi používány v průmyslových odvětvích (stavebnictví, letectví a automobilový průmysl). Informace získané z ohybových zkoušek přispívají k návrhu a optimalizaci konstrukčních součástí a pomáhají zajistit bezpečnost a spolehlivost materiálů v různých aplikacích. [52]



Obrázek 13 Zkouška tří-bodovým a čtyř-bodovým ohybem [53]

Při ohybových zkouškách se zaznamenávají a měří různé hodnoty, které dále poskytují informace o mechanických vlastnostech materiálu při ohybu.

Příklady důležitých hodnot získaných z ohybové zkoušky:

- Deformace (Deflection): U této zkoušky se měří ohyb vzorku v průběhu testu. Deformace bývá často sledována v závislosti na zatížení a umožňuje pozorovat chování materiálu při ohybu.
- Zatížení (Load): Zde vidíme sílu působící na vzorek během ohybové zkoušky. Zatížení bývá obvykle měřeno v jednotkách Newtonůch či kilogramech a můžeme ho sledovat po celou dobu zkoušky.
- Pevnost v ohybu (Flexural Strength): Pevnost v ohybu znamená maximální hodnotu zatížení, které vzorek může ještě při ohybu vydržet, dříve, než dochází k jeho prasknutí. Tento parametr udáváme v jednotkách tlaku, například v megapascalích (MPa).
- Modul pružnosti v ohybu (Flexural Modulus): Tímto modulem pružnosti v ohybu se vyjadřuje tuhost materiálu při ohybu. Jde zde o poměr mezi zatížením a deformací v lineární části ohybové zkoušky. Tato hodnota se vyjadřuje také v jednotkách tlaku, například v gigapascalích (GPa).
- Ohybová napětí (Flexural Strain): Ohybovou napětí se vyjadřuje míru deformace vzorku při ohybu. Zaznamenává se v procentech nebo v desetínách procenta.
- Pracovní plocha pod ohybem (Work done under Flexure): Touto hodnotou se udává energii spotřebovanou při ohybu vzorku. Bývá měřena jako plocha pod křivkou zatížení-deformace. [15]

Tyto získané hodnoty potřebujeme pro co nejlepší posouzení chování materiálu vystavenému ohybu a také bývají klíčové pro návrh a inženýrské aplikace. Přesné hodnoty závisejí na konkrétních vlastnostech materiálu a také podmínkách při provedení zkoušky. Musíme mít na paměti i dané požadavky normy nebo specifikace, podle kterých se ohybová zkouška provádí. [15]

7.4 Testování mechanických vlastností kompozitu

7.4.1 Testování ohybových vlastností

Normy pro prepregy při ohybové zkoušce považujeme za hlavní prvek v oblasti kvality a spolehlivosti materiálů používaných v současném moderním inženýrství, a to především v oblasti zabývající se výrobou kompozitních materiálů. Prepregy se stávají stále častěji populárnějšími materiály při výrobě lehkých, ale přitom pevných kompozitních konstrukcí v mnoha odvětvích.

Ohybová zkouška se stává jedním z klíčových testů umožňující posoudit mechanické vlastnosti prepregů a zaručit plnění stanovených standardů. Tyto normy stanovují jasně dané postupy pro provedení ohybové zkoušky, parametry testu a kritéria hodnocení výsledků. Cílem těchto testů bývá poskytnutí konzistentních a reprodukovatelných výsledků umožňující konstruktérům a výrobcům spolehlivě charakterizovat chování prepregů v ohybu. [51]

Normy pro prepregy vypracovávají standardizační organizacemi, které vydávají požadavky a procedury pro výrobu, testování a použití prepregů. Vytvářením norem pro kompozitní materiály a prepregy se zabývá několik organizací. Některé z těchto uvedených normativních dokumentů mohou být vydávány organizacemi jako ASTM International, ISO (Mezinárodní organizace pro normalizaci) nebo DIN (Německý institut pro normalizaci). [51]

Příklady norem jsou například:

- ASTM D3171 – Standard Test Methods for Constituent Content of Composite Materials: Tato norma se zaměřuje na stanovení obsahu pryskyřice v kompozitních materiálech a také může být relevantní pro prepregy. [54]
- ASTM D2734 – Standard Test Methods for Void Content of Reinforced Plastics: V této normě se určují postupy pro stanovení obsahu dutin v kompozitních materiálech, též může být nezbytná pro prepregy. [54]
- ASTM D790-17 – Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials: Vlastnosti v ohybu stanovené touto zkušební metodou bývají velmi užitečné pro účely kontroly kvality a specifikace. Obsahují napětí v ohybu, namáhání v ohybu a pevnost v ohybu. [54]

- ISO ČSN EN ISO 178 – Stanovení ohybových vlastností: Tato norma uvádí metodu pro stanovení ohybových vlastností tuhých plastů a polotuhých plastů předem za definovaných podmínek. Uvádí se řada hodnot zkušebních rychlostí. Metoda se používá ke zjišťování chování zkušebních těles při zatížení ohybem a také pro stanovení pevnosti v ohybu, modulu pružnosti v ohybu a dalších závislostí vznikajícím mezi napětím a deformací za jasně definovaných podmínek. Dochází k zatěžování zkušebního tělesa, které se volně podepře dvěma podpěrami přitlačným trnem uprostřed jejich rozpětí (tříbodový ohyb). Metoda se provádí u materiálů: termoplasty pro tváření, vytlačování a odlévání, včetně plněných a vyztužených termoplastů; desky z tuhých termoplastů; - reaktoplasty pro tváření, včetně plněných a vyztužených materiálů; desky z reaktoplastů. [55]
- ISO 10618 - Uhlíková vlákna – Stanovení tahových vlastností příze impregnované pryskyřicí: specifikuje zkušební metodu pro stanovení pevnosti v tahu, modulu pružnosti v tahu a deformace při maximálním zatížení vzorku příze impregnované pryskyřicí. Metoda se využívá pro příze (nekonečné příze a příze ze staplových vláken) z uhlíkových vláken pro použití jako výztuže v kompozitních materiálech. [56]
- ČSN EN ISO 14125 – Vlákny vyztužené plastové kompozity – Stanovení ohybových vlastností: V této normě se předepisuje metoda stanovení ohybových vlastností vláknů vyztužených plastových kompozitu tříbodovým a čtyřbodovým zatěžováním. Definují se zde standardní zkušební tělesa a parametry zahrnující i jiné velikosti zkušebních těles, pokud byla ověřena jejich vhodnost. Uvádí se řada zkušebních rychlostí. Tato metoda se nedoporučuje pro stanovení konstrukčních parametrů, ale může se nedoporučuje k posouzení materiálů a pro účely kontroly kvality. Metoda se však využívá pro vlákny vyztužené termoplastové a reaktoplastové kompozity. Norma byla naposledy revidována a potvrzena v roce 2019, proto zůstává aktuální. [57]

Vždy musíme mít na paměti, že mohou existovat další specifikace a standardy, které mohou být používány na různé aspekty prepregů. Pokud chceme dosahovat správných výsledků a zajistit kvalitu materiálu v konkrétních projektech, mělo by být samozřejmostí konzultovat a také dodržovat platné normy. [52]

II. PRAKTICKÁ ČÁST

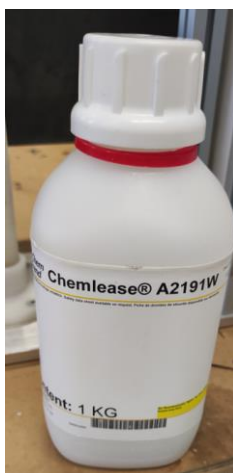
8 CÍLE DOSAŽENÍ PRAKTICKÉ ČÁSTI

1. Literární rešerše na problematiku kompozitních materiálu, problematiku vlivu vlhkosti na mechanické vlastnosti, aktuální poznatky vlivu agresivních prostředí na mechanické vlastnosti a přehled metodik pro experimentální testování kompozitu.
2. Návrh materiálového složení kompozitních vzorků s ohledem na využití různých druhů vláken.
3. Experimentální příprava zkušebních vzorků z uhlíkového, skelného a uhlík-aramidového prepregu pro zvolenou technologii lisování prepregu v polymerizačním autoklávu.
4. Výroba/Vytvrzení prepregu v polymerizačním autoklávu a následná příprava zkušebních tělísek pro statickou zkoušku ohybem a tahem
5. Expozice zkušebních těles do pěti vybraných typů agresivního prostředí na dobu cca 500 hodin.
6. Experimentální testování tahových a ohybových vlastností všech vzorků dle zvolených norem.
7. Diskuse výsledku a závěr diplomové práce.

9 VYUŽITÉ PREPREGY A PŘÍPRAVKY PRO ODFORMOVÁNÍ

9.1 Chemlease A2191W

Tuto látku jsme využili především na vyplnění vlasových prasklin na skleněné formě, které by mohly způsobit nerovnoměrné rozložení pryskyřice v prepregu. Přípravek jsme nanесли rovnoměrně v pěti stejných vrstvách. Mezi aplikací jednotlivých vrstev se čekalo deset minut, než se nanесли další vrstva. Tento přípravek se velmi lehce nanášel papírovými ubrousky a celkově jeho použití bylo velmi jednoduché. Vše probíhalo při teplotě okolního prostředí, kdy docházelo k přirozenému vysušení před nanesením dalších vrstev. Pokud by se dále neodformovalo, tak je nutné počkat 1 hodinu předtím, než se začne klást prepreg. [58]



Obrázek 14 Odformovací prostředek 1

9.2 Zyxax Sealer GP

Tento přípravek slouží ke snadnému odformování kompozitů od formy. Jeho aplikace probíhala podobně jako u Chemlease A2191W, ale rozdíl byl v tom, že na formě zanechával čmouhy podobné vosku, oproti předchozí látce. Tato látka je v kapalně podobě a je nutná velmi rychlá aplikace, jelikož dochází k rychlému usychání. Na formu se musel aplikační ubrousek několikrát namočit, protože jedno smočení nebylo dostačující. Na formu se nanášely vrstvy o 90° ve 4 vrstvách po 15 minutách. Po poslední vrstvě u tohoto přípravku je nutno čekat 30 minut, než se začne klást prepreg. [59]



Obrázek 15 Oformovávací prostředek 2

9.3 Prepreg

Pro prepregy jsme použili pryskyřici typu IMP503Z, která je vhodná pro vytvrzování v autoklávu. Tato pryskyřice byla plněna tkaninou s keprovou vazbou. V pryskyřici jsou tři typy tkanin – skelná, uhlíková a hybridní tkanina uhlíku a prepregu. Všechny využitě prepregy se naskládaly do šesti vrstev. Vrstvy byly naskládány 0° a 45° a z toho první vrstva byla položena pod úhlem 0° . Vše jsme pokládaly na hotové odformované formy. Tyto formy s prepregy se připravily do autoklávu, kde následně proběhl vytvrzovací cyklus. [60]



Obrázek 16 Desky pro vzorky

10 POUŽITÉ AGRESIVNÍ LÁTKY A SEPAROVAČE

Pro vyzkoušení materiálů jsme použili pět agresivních látek k experimentu.

Využil se:

- roztok 20 % soli ve vodě,
- roztok 20 % kyseliny sírové,
- motorový olej,
- roztoky 0,5 % Bacobanu a Incidinu Rapidu ve vodném prostředí.

10.1 Motorový olej

Kompozity se často používají na nádrže, trubky, jimiž proudí benzín, či motorový olej a jim podobné látky. Pro náš experiment se zvolil starý motorový olej, který byl zbaven pouze pevných nečistot. Olej musí kromě mazavosti splňovat několik dalších podmínek, jednou z těchto podmínek je korozivzdornost. Koroze vzniká kyselostí oleje při překročení jeho životnosti, a proto je tedy nezbytně pravidelně olej měnit. Motor je velmi složitá část, která je zásadní pro samotný pohon stroje, tudíž musíme dbát na to, aby se nám nezanášel. Z toho důvodu se do oleje přidávají detergentní a disperzní přísady. Zajímavou vlastností oleje je slučitelnost s plastovými materiály. To znamená, že by plasty neměli měnit jeho vlastnosti. Plasty musí splňovat řadu kritérií, aby mohl být použit pro motorové oleje. Motorový olej se velmi špatně čistil ze vzorků.

10.2 Roztok 20 % chloridu sodného ve vodě

Námi připravený roztok je mírně kyselý, z důvodu chlorových atomů v roztoku. Ovlivňuje však mechanické vlastnosti především tahovou pevnost prepregu, ale na druhou stranu nám příznivě působí na odolnost vůči růstu hub a plísní. Sůl též může ovlivnit pozitivně či negativně adhezi prepregu, která závisí na typu pojiva. Z dlouhodobého hlediska solný roztok degraduje prepreg, z důvodu chemických reakcí.

10.3 Roztok 20 % kyseliny sírové ve vodě

Zředěná kyselina sírová je velmi žíravá látka. Z tohoto důvodu se použila skleněná nádoba pro zkušební vzorky. Při smíchání kyseliny sírové s vodou vzniká exotermní reakce, což znamená, že produkuje velké množství tepla, které by mohlo v případě prudkého nárazu velmi snadno prasknout. V roztoku s vodou způsobuje velmi silné chemické reakce. Většinu organických látek zuhelnatuje. My jsme použili počáteční roztok 96 % kyseliny sírové a ten se zředil na 20 % roztok. Pryskyřice na vzorcích zružověla na okrajích, nejlépe to jde vidět na prepřecích plněným skelnými vlákny.

10.4 Roztok 0,5 % Incidin Rapid

Slouží k čištění a dezinfekci v provozech, kde je nezbytná mikrobiologická čistota povrchů. Je nutné ředit studenou vodou, která nepřesáhne teplotu 30 °C. Jeho účinnost je vysoká i při velmi malých koncentracích čistícího prostředku a tím, že používáme malé množství je zajištěna i hospodárnost produktu. Tenhle přípravek udává, že by měl být kompatibilní s mnoha materiály. Čistící prostředek se naředil na 0,5 % roztok. U zvolených čistících prostředků je z technického pohledu zajímavé, že pro vytvoření stejné koncentrace přípravků je potřeba stejného množství koncentráту. [61]

10.5 Roztok 0,5 % Bacoban WB

Tento přípravek je využíván především v lékařském prostředí. Daný prostředek neobsahuje aldehydy a fenoly. Používá se k dezinfekci na lékařské lehátka, přístroje a stoly. Protože neobsahuje alkohol, je možné s ním čistit i lékařské sondy citlivé na alkohol. Je účinný na širokou škálu vůči bakteriím, plísním a virům. Jeho pH v 0,5% roztoku je 7. V koncentráту má čirou až nažloutlou barvu. Pro naše účely se prostředek zředil na 0,5 % roztok, který se také v této koncentraci nejvíce využívá v běžném provozu zdravotnických zařízení. Zde jsme pro 3 l vody jsme naředili 15 ml koncentrovaného prostředku. [62]



Obrázek 17 Na pravo ve předu Incidin Rapid, za ním motorový olej, za olejem bacoban, na levo kyselina sírová a za ní roztok soli

11 POUŽITÉ PŘÍSTROJE

11.1 Autokláv

Pro vyztužení tří desek o rozměrech 500x500 mm se použil autokláv modelu G00300572 od výrobce OP Panini s.r.l.. Stroj dokáže tlakovat do 10 barů při teplotách od 0 °C až po 250°C. Pro řízení a nastavení cyklu v autoklávu slouží PLC obrazovka. Autokláv je napojen centrální okruh stlačeného vzduchu.

Výrobce prepregů uvádí doporučený cyklus pro vytvrzovací cyklus v autoklávu. Nejdříve se vyčerpá vzduch na vakuum okolo -0,9 až -1 bar. Poté se komora začíná tlakovat a vyhřívat na 125 °C. Tento tlak musí být dosažen předtím, než teplota dosáhne 80 °C. Po dosažení obou hodnot, prepreg zůstává v autoklávu okolo 1 hodiny. Poté se prepregy chladí na určenou teplotu 60 °C. Poslední krok je odtlakování autoklávu a vyndání prepregu z autoklávu. Tento program se nastavil na PLC obrazovce autoklávu, kde se vytvrzovaly tři desky o rozměrech 500x500x2 mm pro uhlíkový a hybridní prepreg a 500x500x1 mm pro skelný prepreg. [63]

11.2 Vodní paprsek

Pro nařezání vzorků se využil vodní paprsek, který vyřezal vzorky pro tahovou zkoušku o rozměrech 250x15 mm a pro ohybovou zkoušku o rozměrech 80x15 mm. Program pro vytvoření vzorků byl zhotoven v Draftsight.

11.3 Popis ohybové zkoušky

Zkouška se prováděla na zkušebním stroji Zwick 1456 dle ČSN EN ISO 14125 pro tříbodový ohyb. Pro zkušební tělíska plněná uhlíkem a uhlík-aramidovými vlákny byla nastavena rozteč mezi pevnými podpěrami 80 mm a pro prepreg plněný skleněnými vlákny se následně nastavila vzdálenost 30 mm. Zkušební těleso se pokládá vycentrované na pevné podpěry, tak aby třetí pohyblivá podpěra byla na středu zkušebního tělíska. Těleso se vystavuje ohybu do chvíle, než nastane přerušeni materiálu nebo ukončíme zkoušku po dosažení maximální síly. Rychlost měření se měnila z 1 Ns⁻¹ na 20 Ns⁻¹ z důvodu změření modulu pružnosti v ohybovém zatížení. Z těchto hodnot vycházejí materiálové vlastnosti v ohybu. [64]

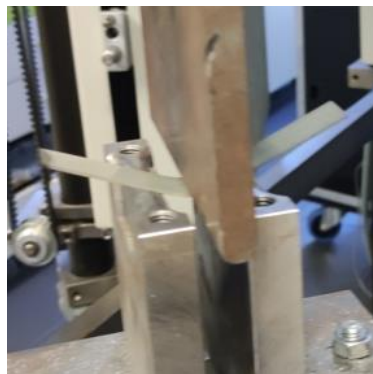
Tyto hodnoty se zjišťují z těchto vzorců:

Napětí v ohybu [MPa]:

$$\sigma_o = \frac{3 * F * L}{2 * b * h^2} \quad (1)$$

Modul pružnosti v ohybu [MPa]:

$$E_o = \frac{L^3}{4 * b * h^2} * \left(\frac{\Delta F}{\Delta y} \right) \quad (2)$$



Obrázek 18 Ohybová zkouška

11.4 Popis tahové zkoušky

Zkouška se prováděla na stejném zkušebním stroji Zwick 1456, na kterém se prováděla ohybová zkouška. Tahová zkouška se řídila dle normy ČSN EN ISO 527-4. Zkušební tělíska byla vyřezána o velikosti 250x15 mm a tloušťka závisela na materiálu prepregu. Jedna série je po pěti kusech tělísek. Zkouška se prováděla jak za celkového upnutí pomocí pneumatických úpinek a část zkušebních těles ze začátku se upínala v mechanické horní úpince. Z mechanické úpinky se tělesa velmi špatně držela. Na změření modulu pružnosti byl uchycen na tělíska extenzometr. Zkouška probíhala do bodu, kde proběhlo přerušení zkušební tělesa. Po naměření se zjišťují mechanické vlastnosti v tahu. [65]

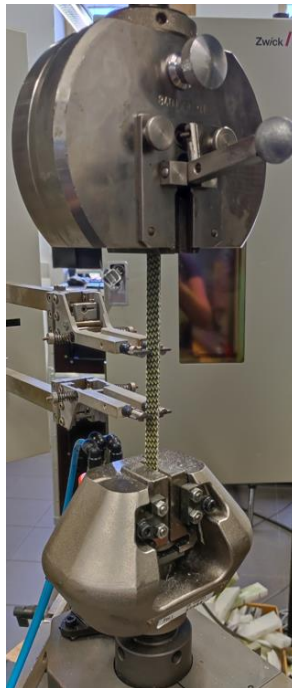
Hodnoty se zjišťují z těchto vzorců:

Napětí v tahu [MPa]:

$$\sigma_t = \frac{F_t}{b * h} \quad (3)$$

Modul pružnosti v ohybu [MPa]:

$$E_t = \frac{\sigma_t}{\varepsilon} = \frac{F_t * l_0}{b * h * (l - l_0)} \quad (4)$$



Obrázek 19 Tahová zkouška

12 VÝSLEDKY A PRŮBĚH MĚŘENÍ

12.1 Ohybová zkouška

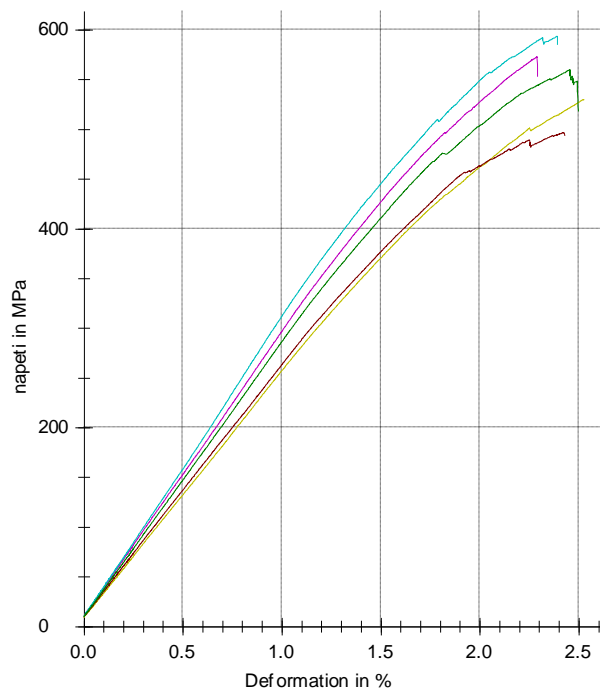
12.1.1 Referenční ohybová zkouška bez vlivu agresivních látek

Pro porovnání, jak ovlivnili agresivní látky zkušební tělesa, se odložilo pět vzorků od každého typu prepregu a nechali se bokem agresivních látek.

- **Prepreg s uhlíkovými vlákny**

Tab. 1 Naměřené a zpracované výsledky z ohybové zkoušky 1

n=5	E_o [MPa]	σ_{max} [MPa]	F_{max} [N]	ϵ_y [mm]	ϵ_y [%]	W [J]	h [mm]	b [mm]
1	28 900	573	257	12,8	2,3	1,85	1,9	14,9
2	29 500	594	266	13,4	2,4	2,08	1,9	14,9
3	24 600	530	272	13,5	2,5	2,08	2	15,36
4	25 600	497	242	13,4	2,4	1,93	1,92	15,88
5	27 500	560	272	13,6	2,5	2,15	1,92	15,83
\bar{x}	27 200	551	262	13,4	2,4	2,02	1,928	15,37
$S_{\bar{x}}$	2 090	38	12,5	0,3	0,1	0,12	0,04	0,5
$v_{\bar{x}}$ [%]	7,7	6,89	4,78	2,25	3,61	6,16	2,15	3,11
u_a	1 312,94	23,78	7,93	0,20	0,05	0,08	0,03	0,30



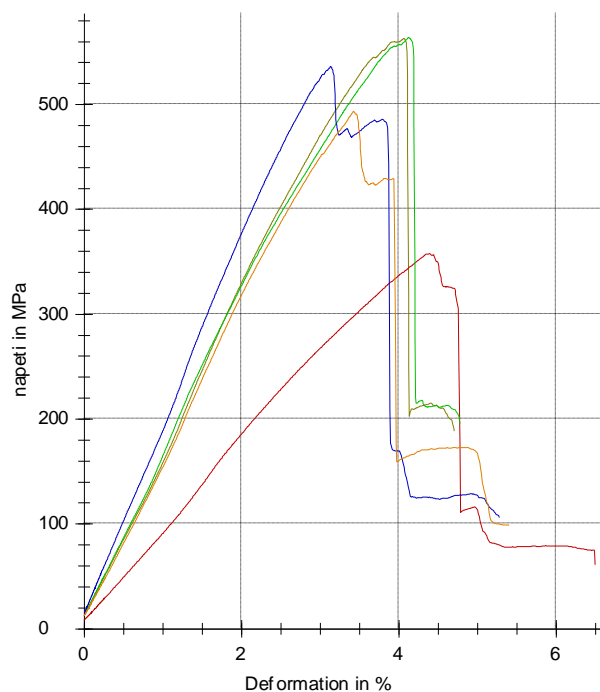
Obrázek 20 Průběh ohybového napětí v závislosti na deformaci pro tělíska 1

V grafu je zakreslen průběh měření v ohybu, ale nevidíme v něm žádné zvláštnosti. Pro náš model pružnosti v aritmetickém průměru se směrodatnou odchylkou činí $27\,200 \pm 2\,090$ MPa, maximální napětí v ohybu 551 ± 38 MPa při působení maximální síly $262 \pm 12,5$ N, velikost poměrové deformace činí $13,4 \pm 0,3$ mm, což po převedení činí ohyb na $2,4 \pm 0,1$ % a nutná práce pro ohnutí je $2,02 \pm 0,12$ J.

- **Prepreg se skleněnými vlákny**

Tab. 2 Naměřené a zpracované výsledky z ohybové zkoušky 2

n=5	E_o [MPa]	σ_{max} [MPa]	F_{max} [N]	ϵ_y [mm]	ϵ_y [%]	W [J]	h [mm]	b [mm]
1	14 700	563	233	5,5	4,1	0,73	1,1	15,4
2	8 230	358	216	5	4,4	0,59	1,32	15,62
3	15 000	564	239	5,6	4,1	0,76	1,1	15,74
4	18 000	536	198	4,5	3,1	0,48	1,05	15,09
5	13 700	494	207	4,7	3,4	0,52	1,1	15,59
\bar{x}	13 900	503	219	5,1	3,8	0,62	1,134	15,49
$S_{\bar{x}}$	3 570	86	17,1	0,5	0,5	0,12	0,11	0,3
$v_{\bar{x}}$ [%]	25,64	17,11	7,82	10,04	13,7	20,01	9,37	1,64
u_a	2 232,31	53,78	10,80	0,30	0,34	0,08	0,07	0,16



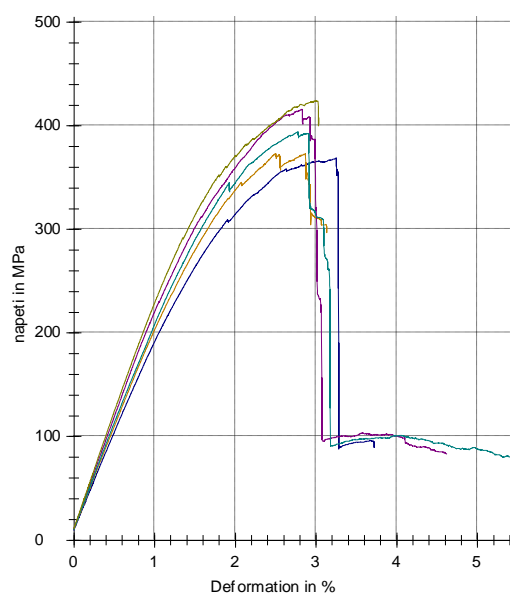
Obrázek 21 Průběh ohybového napětí v závislosti na deformaci pro tělíska 2

V grafu vidíme na třech výsledcích kolísat v maximální hodnotě vrchol grafu, kde v určitou chvíli ještě síla začne znovu růst, ale nikdy nedosáhla maxima jako při prvním vrcholu. To by mohlo naznačovat několik vad, nebo že je směr vláken jiný. Zajímavé je, že jeho tloušťka je silnější, což by značilo nějaký nepředvídatelný jev, který se udál během tří týdnů. Proto také je průměr a směrodatná odchylka pro některé hodnoty velmi velká. Což nám dává průměrnou velikost modulu pružnosti $13\,900 \pm 3\,570$ MPa, maximální napětí 503 ± 86 MPa a maximální sílu $219 \pm 17,1$ N. Je zajímavé, že velikost poměrové deformace a práce je téměř průměrná hodnota vzorku měrného prohnutí, která činila $5,1 \pm 0,5$ mm, a to činí v procentech $3,8 \pm 0,5$ %, a nutná práce pro ohnutí je $0,62 \pm 0,12$ J.

- **Hybridní prepreg s aramid/uhlíkovými vlákny**

Tab. 3 Naměřené a zpracované výsledky z ohybové zkoušky 3

n=5	E_o [MPa]	σ_{max} [MPa]	F_{max} [N]	ϵ_y [mm]	ϵ_y [%]	W [J]	h [mm]	b [mm]
1	19 100	369	179	18	3,2	2,16	1,92	15,83
2	20 100	373	169	14,2	2,5	1,45	1,88	15,39
3	21 900	416	187	16,1	2,8	1,9	1,87	15,45
4	20 500	394	182	15,6	2,8	1,79	1,89	15,55
5	22 600	424	184	17,3	3	2,09	1,86	15,06
\bar{x}	20 800	395	181	16,2	2,9	1,88	1,884	15,46
$S_{\bar{x}}$	1 400	24,6	6,9	1,5	0,3	0,3	0,02	0,3
$v_{\bar{x}}$ [%]	6,74	6,23	3,83	9,17	9,69	14,98	1,22	1,8
u_a	881,00	15,47	4,36	0,93	0,17	0,18	0,01	0,17



Obrázek 22 Průběh ohybového napětí v závislosti na deformaci pro tělíska 3

Z grafu a v naměřených hodnotách není vidět nic nápadného. Průměrná hodnota se směrodatnou odchylkou pro modul pružnosti je $20\,800 \pm 1400$ MPa, maximální napětí $395 \pm 24,6$ MPa vypočtené z maximální síly $181 \pm 6,9$ N, poměrová deformace $16,2 \pm 1,5$ mm, které se přepočítlo na procenta o velikosti $2,9 \pm 0,3$ %, a vykonaná práce pro ohnutí je $1,88 \pm 0,3$ J.

Když porovnáme tyto výsledky všech tří referenčních vzorků, nacházíme u hybridního prepregu, že velikost modulu pružnosti, poměrové deformace v procentech a vykonané práce se hodnoty nachází mezi hodnotami pro uhlíkový a skelný prepreg. Největší zajímavostí je, že maximální hodnota napětí, působící síly a poměrové deformace je u aramido-uhlíkového prepregu nejmenší. Zajímavé je i u hybridního to že poměrová deformace v procentech se řadí mezi oba další typy vzorků, a přitom poměrová deformace v milimetrech je nejmenší ze všech tří typů prepregů.

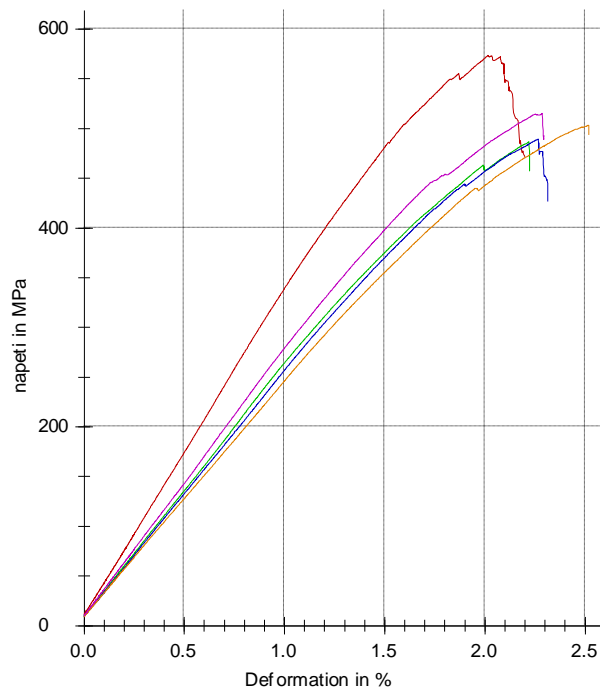
12.1.2 Roztok vody v 0,5 % Incidin Rapid

Zde jsme připravili směs vody a agresivní látky, ve kterém bylo ponořeno pět těles od každého typu prepregu.

- Prepreg s uhlíkovými vlákny

Tab. 4 Naměřené a zpracované výsledky z ohybové zkoušky 4

n=5	E_o [MPa]	σ_{max} [MPa]	F_{max} [N]	ϵ_y [mm]	ϵ_y [%]	W [J]	h [mm]	b [mm]
1	32 500	574	249	11,6	2	1,63	1,86	15,06
2	25 300	487	242	12,1	2,2	1,66	1,96	15,56
3	24 600	489	250	12,1	2,3	1,71	1,99	15,5
4	23 900	503	276	13	2,5	2,06	2,06	15,5
5	26 800	515	249	12,5	2,3	1,8	1,95	15,26
\bar{x}	26 600	514	253	12,3	2,3	1,77	1,964	15,38
$S_{\bar{x}}$	3 440	35,4	13	0,5	0,2	0,2	0,07	0,2
$v_{\bar{x}}$ [%]	12,93	6,89	5,12	4,42	7,88	9,75	3,68	1,37
u_a	2 165,03	22,30	8,23	0,33	0,12	0,11	0,05	0,13



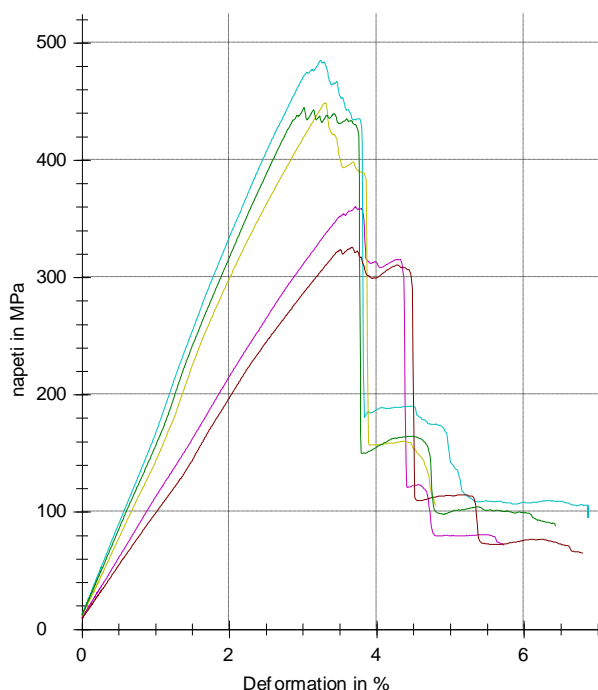
Obrázek 23 Průběh ohybového napětí v závislosti na deformaci pro tělíska 4

Všechny hodnoty měření kromě prvního vzorku vykazují snížení mechanických vlastností v ohybu. Vůči vzhledu vypadali vzorky méně delaminované, ale mohl to být pouze optický klam. První vzorek se naměřilo největší hodnoty napětí na modulu pružnosti, ale nic nenaznačovalo tomu, že bude vybočovat ze zkušebních vzorků. Velikost modulu pružnosti v ohybu je $26\,600 \pm 3\,440$ MPa, maximální napětí je $514 \pm 35,4$ MPa s maximální silou 253 ± 13 N, poměrová deformace je $12,3 \pm 0,5$ mm po přepočítání na procenta je $2,3 \pm 0,2$ % a vykonaná práce v ohybu je $1,77 \pm 0,2$ J.

- **Prepreg se skleněnými vlákny**

Tab. 5 Naměřené a zpracované výsledky z ohybové zkoušky 5

n=5	E_o [MPa]	σ_{max} [MPa]	F_{max} [N]	ϵ_y [mm]	ϵ_y [%]	W [J]	h [mm]	b [mm]
1	10 300	360	191	4,4	3,7	0,46	1,25	15,24
2	15 800	485	197	4,5	3,2	0,48	1,09	15,39
3	12 900	449	195	4,3	3,3	0,45	1,14	15,03
4	9 160	326	181	4,3	3,7	0,43	1,27	15,48
5	14 600	445	187	4,1	3	0,41	1,09	15,87
\bar{x}	12 600	413	190	4,3	3,4	0,45	1,168	15,4
$S_{\bar{x}}$	2 830	66,9	6,6	0,1	0,3	0,03	0,09	0,3
$v_{\bar{x}}$ [%]	22,53	16,19	3,46	2,94	8,74	6,33	7,42	2,03
u_a	1 755,69	41,86	4,02	0,09	0,20	0,02	0,05	0,20



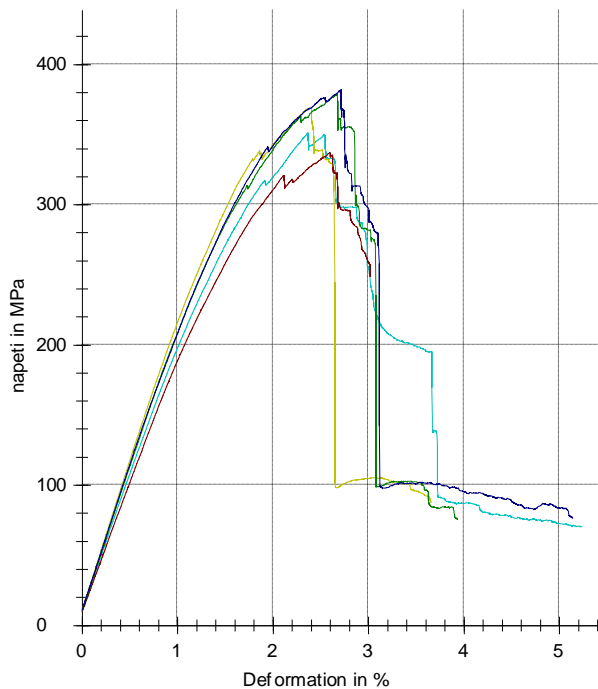
Obrázek 24 Průběh ohybového napětí v závislosti na deformaci pro tělíska 5

Z tabulky i z grafu lze vidět velký pokles mechanických vlastností, především u modulu pružnosti u napětí a u poměrové deformace. Zde se neprojevil viditelná vzhledová vada po deformaci. Zde hodnoty naměřených hodnot snížili u modulu pružnosti na $12\,600 \pm 2\,830$ MPa, maximální napětí na $413 \pm 66,9$ MPa přepočítána ze síly $190 \pm 6,6$ N, u poměrové deformace nejvíc je vidět u $4,3 \pm 0,1$ mm, kde u procent to nelze velmi rozlišit rozdíl o velikosti naměřeného průměru v procentech je $3,4 \pm 0,3$ % a vykonaná práce je $0,45 \pm 0,03$ J.

- **Hybridní prepreg s aramid/uhlíkovými vlákny**

Tab. 6 Naměřené a zpracované výsledky z ohybové zkoušky 6

n=5	E_o [MPa]	σ_{max} [MPa]	F_{max} [N]	ϵ_y [mm]	ϵ_y [%]	W [J]	h [mm]	b [mm]
1	19 700	351	166	13,4	2,4	1,34	1,88	16,07
2	21 400	369	170	14,1	2,4	1,48	1,82	16,67
3	18 500	337	165	14,7	2,6	1,52	1,88	16,64
4	20 500	379	174	15,4	2,7	1,69	1,88	16,06
5	20 900	382	173	15,5	2,7	1,7	1,86	15,68
\bar{x}	20 200	364	170	14,6	2,5	1,55	1,864	16,22
$S_{\bar{x}}$	1 120	19	3,8	0,9	0,2	0,15	0,03	0,4
$v_{\bar{x}}$ [%]	5,53	5,23	2,22	6,15	6,18	9,84	1,4	2,61
u_a	711,11	12,01	2,54	0,56	0,10	0,09	0,02	0,27



Obrázek 25 Průběh ohybového napětí v závislosti na deformaci pro tělíska 6

U hybridního prepregu nelze zjistit, kromě mírného poklesu mechanických vlastností velký rozdíl. Modul pružnosti je $20\,200 \pm 1\,120$ MPa, maximální napětí v ohybu je 364 ± 19 MPa s maximální naměřenou působící silou na zkušební tělese $170 \pm 3,8$ N, poměrová deformace je $14,6 \pm 0,9$ mm a v procentech je $2,5 \pm 0,2$ %, a práce využitá pro stroj je $1,55 \pm 0,15$ J. U tohoto prepregu lze pozorovat menší delaminace než u vzorků bez vlivu.

Jde vidět, že některé hodnoty vybočují z normálního uskupení především u skelného a uhlíkového vlákna. U grafů pro hybridní a skelný prepreg je vidět, že je větší kolísání v maximálních hodnotách. V tabulkách naměřených hodnot je to nezjistitelné, protože bychom měli velmi mnoho dat na zpracování.

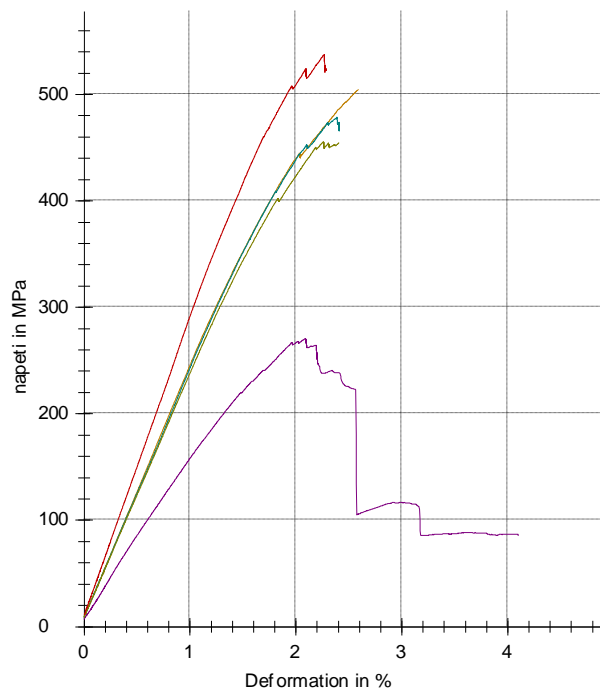
12.1.3 Roztok vody s 20 % soli

Připravili jsme směs v 3 l kanystru, který byl naplněn vodou s odpočítaným množstvím 20 % roztoku soli ve vodném prostředí. Sůl bylo nutné nechat před zkouškou rozpustit, proto se připravil roztok dopředu, aby se vložili vzorky do připraveného roztoku. Na povrchu všech těles je jemná vrstva soli.

- Prepreg s uhlíkovými vlákny

Tab. 7 Naměřené a zpracované výsledky z ohybové zkoušky 7

n=5	E_o [MPa]	σ_{max} [MPa]	F_{max} [N]	ϵ_y [mm]	ϵ_y [%]	W [J]	h [mm]	b [mm]
1	23 400	505	264	13,8	2,6	2,11	2	15,7
2	16 100	271	186	9,7	2,1	1,05	2,29	15,72
3	23 300	479	252	12,6	2,4	1,81	2,02	15,5
4	23 100	456	243	11,9	2,3	1,63	2,02	15,71
5	27 900	538	253	12,8	2,3	1,86	1,89	15,79
\bar{x}	22 800	450	240	12,2	2,3	1,7	2,044	15,68
$S_{\bar{x}}$	4 210	104	30,9	1,5	0,2	0,4	0,15	0,11
$v_{\bar{x}}$ [%]	18,49	23,22	12,88	12,5	7,99	23,61	7,23	0,69
u_a	2 648,92	65,43	19,33	0,96	0,12	0,25	0,09	0,07



Obrázek 26 Průběh ohybového napětí v závislosti na deformaci pro tělíska 7

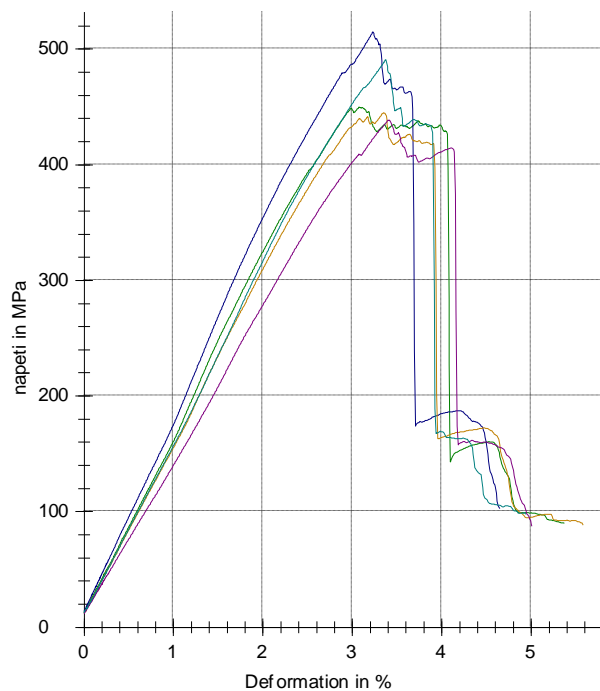
Zde můžeme vidět větší pokles při měření vzorků a vliv soli na uhlíkový prepreg oproti tomu bez vlivu. Většina vzorků se zlomila. Zde máme dva vzorky, které vybočují, je to druhý a poslední vzorek v tabulce. Druhý vzorek má obecně z uhlíkových prepregů nejmenší naměřené hodnoty ze všech ohybových zkoušek a nejvýrazněji se to poznalo i velkou delaminací vzorku. Poslední vzorek má vyšší hodnotu z této série měření. Průměrná hodnota z naměřených vzorků je pro modul pružnosti $22\,800 \pm 4\,210$ MPa, maximální napětí je

450±104 MPa se zatěžující silou 240±30,9 N, poměrová deformace činí 12,5±1,5 mm a převedené na procenta 2,3±0,2 % a vykonanou prací 1,7±0,4 J.

- **Prepreg se skleněnými vlákny**

Tab 8 Naměřené a zpracované výsledky z ohybové zkoušky 8

n=5	E_o [MPa]	σ_{max} [MPa]	F_{max} [N]	ϵ_y [mm]	ϵ_y [%]	W [J]	h [mm]	b [mm]
1	14 700	450	185	4,3	3,1	0,43	1,08	15,82
2	16 400	515	195	4,6	3,2	0,48	1,06	15,16
3	14 600	445	189	4,6	3,3	0,49	1,1	15,77
4	13 000	438	193	4,5	3,4	0,46	1,14	15,25
5	14 400	491	198	4,6	3,4	0,49	1,09	15,25
\bar{x}	14 700	468	192	4,5	3,3	0,47	1,094	15,45
$S_{\bar{x}}$	1 220	33,3	5,19	0,1	0,1	0,02	0,03	0,3
$v_{\bar{x}}$ [%]	8,34	7,12	2,71	3,15	4,06	5,29	2,71	2,06
u_d	759,10	20,98	3,19	0,08	0,08	0,02	0,02	0,20



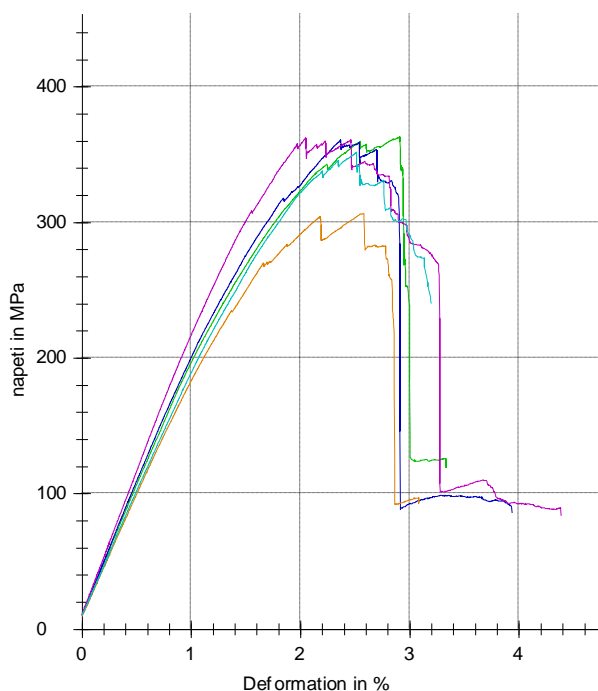
Obrázek 27 Průběh ohybového napětí v závislosti na deformaci pro tělíska 8

U prepregu je zajímavé, že se zvětšil mírně modul pružnosti, ale jinak se ostatní hodnoty se snížili pod naměřené referenční hodnoty naměřených vzorků bez vlivu. Modul pružnosti je 14 700±1 220 s maximálním ohybovým napětím 468±33,3 MPa a působící silou 192±5,19 N. Průměrná hodnota poměrové deformace je 4,5±0,1 mm a jeho převedením na procenta je 3,3±0,1 %. Vykonaná práce při ohyby v průměru se směrodatnou odchylkou je 0,47±0,02 J.

- Hybridní prepreg s aramid/uhlíkovými vlákny

Tab. 9 Naměřené a zpracované výsledky z ohybové zkoušky 9

n=5	E_o [MPa]	σ_{max} [MPa]	F_{max} [N]	ϵ_y [mm]	ϵ_y [%]	W [J]	h [mm]	b [mm]
1	19 400	363	171	16,4	2,9	1,83	1,89	15,79
2	20 000	361	171	13,6	2,4	1,38	1,86	16,45
3	18 200	307	156	14,3	2,6	1,46	1,92	16,59
4	21 100	362	156	12	2	1,08	1,82	15,58
5	18 400	352	165	13,9	2,5	1,38	1,93	15,08
\bar{x}	19 400	349	164	14	2,5	1,4	1,884	15,9
$S_{\bar{x}}$	1 180	24,1	7,5	1,6	0,3	0,3	0,05	0,6
$v_{\bar{x}}$ [%]	6,06	6,9	4,56	11,39	12,7	18,76	2,39	3,94
u_a	746,74	14,95	4,72	0,99	0,21	0,17	0,03	0,39



Obrázek 28 Průběh ohybového napětí v závislosti na deformaci pro tělíska 9

Snížení mechanických vlastností je větší než u 0,5 % roztoku Incidinu Rapidu. I když jsem předpokládala snížení vlastností, tak jsem nepředpokládala, že pokles mechanických vlastností není až tak příliš vysoký u obou zkoušených agresivních látek. Zde jde vidět větší delaminace u všech vzorků, než je u referenčních vzorků obvyklé. U třetího vzorku jde vidět, že maximum není u prvního vrcholu, ale u druhé špičky v grafu. Tento vzorek je v grafu veden oranžovou čarou. Velikost modulu pružnosti je $19\,400 \pm 1\,180$ MPa, napětí je

349±24,1 MPa za působení síly 164±7,5 N, poměrového deformace 14±1,6 mm a přepočtené v procentech je 2,5±0,3 %. Vykonaná práce byla v průměru vypočtena na 1,4±0,3 J.

Zde je u některých vzorků naměřena zajímavá data. U všech vzorků z roztoku soli se vyskytla nějaká anomálie při měření, přesto kromě modulu pružnosti u prepregu plněného sklem se hodnoty vyvinuli dle předpokladů.

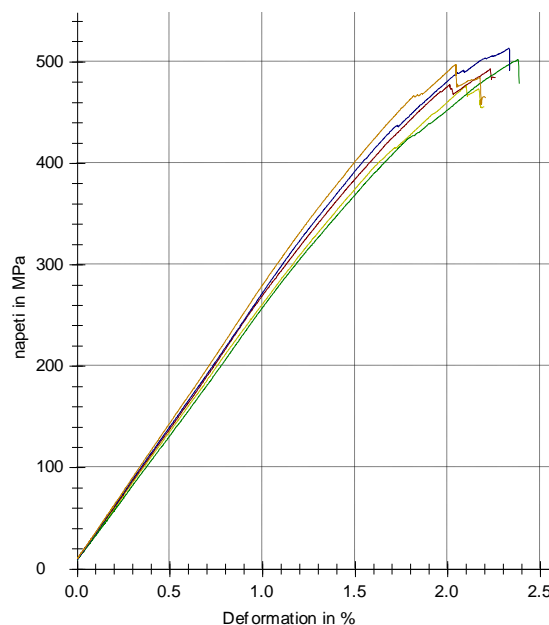
12.1.4 Roztok vody v 0,5 % Baccoban

Příprava tohoto roztoku byla velmi podobná jako u Incidinu Rapidu, jediné, v čem se lišil roztok byla barva vody, místo namodralého odstínu byl roztok nahnědlý.

- **Prepreg s uhlíkovými vlákny**

Tab. 10 Naměřené a zpracované výsledky z ohybové zkoušky 10

n=5	E_o [MPa]	σ_{max} [MPa]	F_{max} [N]	ϵ_y [mm]	ϵ_y [%]	W [J]	h [mm]	b [mm]
1	25 200	477	238	11,4	2,1	1,49	1,97	15,41
2	25 700	493	246	12,3	2,2	1,73	1,94	15,88
3	24 400	502	257	12,9	2,4	1,88	1,97	15,85
4	26 400	514	264	12,6	2,3	1,92	1,98	15,75
5	26 800	498	238	11,3	2	1,49	1,93	15,42
\bar{x}	25 700	497	249	12,1	2,2	1,7	1,958	15,66
$S_{\bar{x}}$	963	13,4	11,8	0,7	0,1	0,2	0,02	0,2
$v_{\bar{x}}$ [%]	3,75	2,69	4,76	5,9	6,51	12,17	1,11	1,47
u_a	597,26	8,46	7,27	0,45	0,10	0,13	0,01	0,14



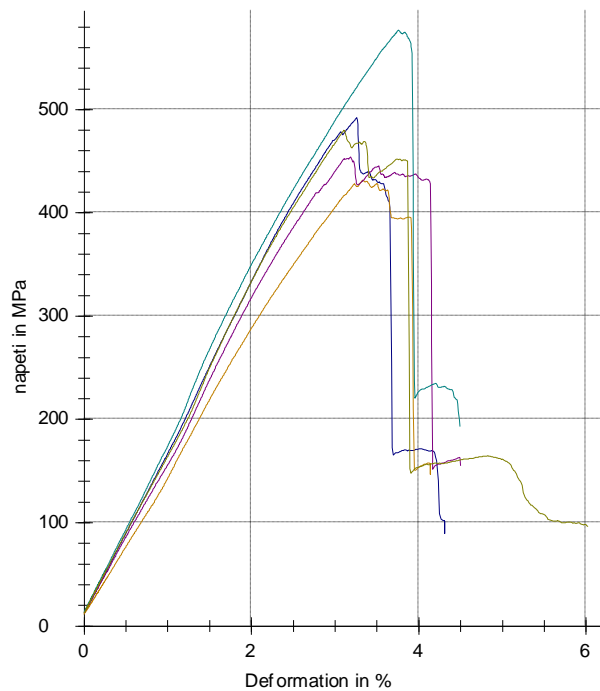
Obrázek 29 Průběh ohybového napětí v závislosti na deformaci pro tělíka 10

U těchto vzorků nastalo snížení mechanických vlastností, ale snížení těchto vlastností je menší, než jsem předpokládala. Průměrné hodnoty pro naměřené hodnoty jsou pro modul pružnosti $25\,700 \pm 963$ MPa, maximální napětí $497 \pm 13,4$ MPa, maximální síla $249 \pm 11,8$ N, poměrová deformace $12,1 \pm 0,7$ mm, která se převedla na procenta $2,2 \pm 0,1$ %, vykonaná práce $1,7 \pm 0,2$ J.

- **Prepreg se skleněnými vlákny**

Tab. 11 Naměřené a zpracované výsledky z ohybové zkoušky 11

n=5	E_o [MPa]	σ_{max} [MPa]	F_{max} [N]	ϵ_y [mm]	ϵ_y [%]	W [J]	h [mm]	b [mm]
1	15 400	492	197	4,5	3,3	0,48	1,08	15,42
2	13 000	431	191	4,4	3,3	0,46	1,14	15,36
3	14 700	454	191	4,3	3,2	0,45	1,11	15,36
4	16 100	577	227	5,3	3,8	0,65	1,07	15,48
5	15 600	480	194	4,3	3,1	0,44	1,09	15,31
\bar{x}	15 000	487	200	4,5	3,3	0,5	1,098	15,39
$S_{\bar{x}}$	1 190	55,5	15,3	0,4	0,3	0,09	0,03	0,07
$v_{\bar{x}}$ [%]	7,97	11,4	7,67	9,06	7,64	18,06	2,53	0,43
u_a	755,22	34,86	9,58	0,27	0,17	0,05	0,02	0,04



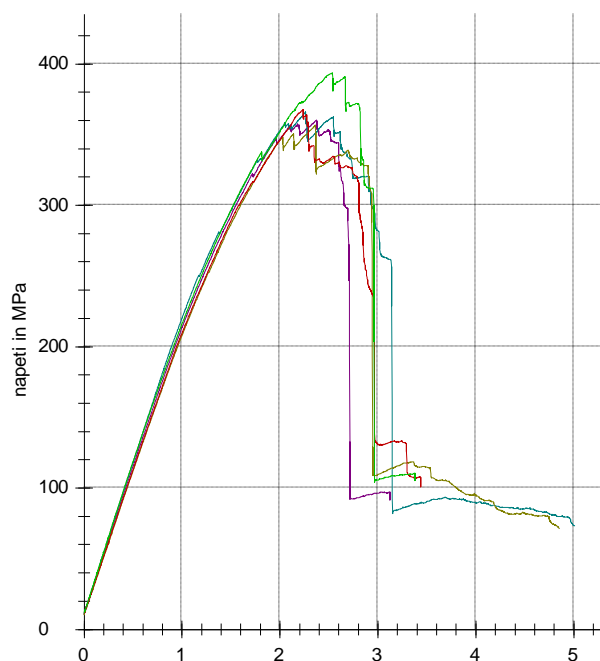
Obrázek 30 Průběh ohybového napětí v závislosti na deformaci pro tělíska 11

Z grafu a z maximálního napětí vidíme, že čtvrtý měřený vzorek má velmi plynulou křivku v grafu spolu s nejvyšším naměřeným maximálním napětím v ohybu v této sérii. V této sérii jako v případě se vzorky v roztoku 20 % soli se zvedl modul pružnosti a ostatní hodnoty mírně poklesly vlastnosti oproti prepregu, na který nepůsobili agresivní látky. Modul pružnosti se pohybuje $15\,000 \pm 1\,190$ MPa, maximální napětí se pohybuje $487 \pm 55,5$ MPa, maximální síla v ohybu $200 \pm 15,3$ N, poměrová deformace je $4,5 \pm 0,4$ mm a přepočtené na procenta je $3,3 \pm 0,3$ % a vykonaná práce je $0,50 \pm 0,09$ J.

- **Hybridní prepreg s aramid/uhlíkovými vlákny**

Tab. 12 Naměřené a zpracované výsledky z ohybové zkoušky 12

n=5	E_o [MPa]	σ_{max} [MPa]	F_{max} [N]	ϵ_y [mm]	ϵ_y [%]	W [J]	h [mm]	b [mm]
1	21 200	360	165	13,8	2,4	1,42	1,84	16,19
2	21 500	366	163	12,8	2,3	1,27	1,88	15,08
3	20 400	357	162	13,4	2,4	1,34	1,88	15,43
4	20 300	368	166	12,9	2,2	1,25	1,85	15,79
5	21 600	394	173	14,6	2,5	1,55	1,85	15,41
\bar{x}	21 000	369	166	13,5	2,4	1,37	1,86	15,58
$S_{\bar{x}}$	610	14,7	4,5	0,7	0,1	0,12	0,019	0,4
$v_{\bar{x}}$ [%]	2,9	3,98	2,69	5,47	5,07	8,92	1,01	2,72
u_a	383,41	9,18	2,71	0,46	0,08	0,08	0,01	0,27



Obrázek 31 Průběh ohybového napětí v závislosti na deformaci pro tělíska 12

U tohoto vzorku si hybridní prepreg zachovává vlastnosti s mírnou nebo žádnou změnou ve vlastnostech. Modul pružnosti je $21\,000 \pm 610$ MPa, maximální napětí $369 \pm 14,7$ MPa při působení síly $166 \pm 4,5$ N, poměrová deformace je $13,5 \pm 0,7$ mm a jde převést na procenta $2,4 \pm 0,1$ % a vykonaná práce je $1,37 \pm 0,12$ J.

U této směsi se neprojeví zásadní nesrovnalosti, všechny vzorky se podobali v hodnotách i grafech vůči referenčním vzorkům. Jediný vzorek, který vyčníval je u skelného prepregu, kde dosahoval materiál na velmi vysokých hodnot na daný vzorek.

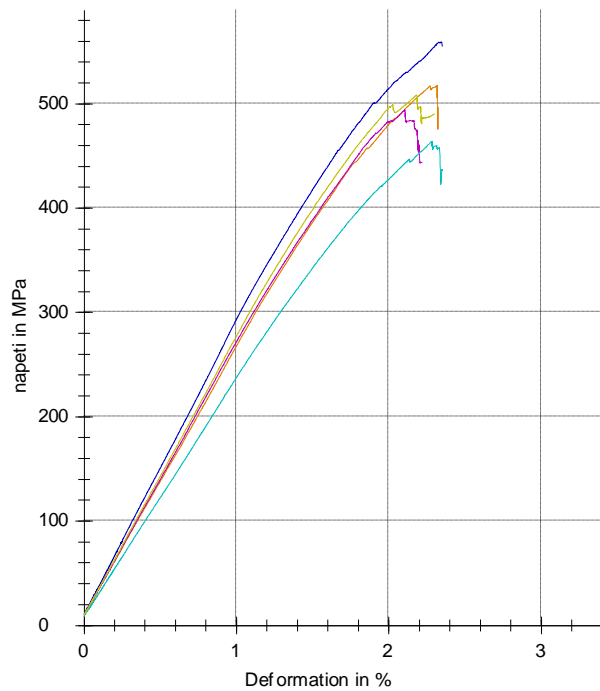
12.1.5 Roztok 20 % kyseliny sírové

U přípravy roztoku kyseliny sírové se muselo dávat pozor, aby se kyselina nevyhlila na žádný povrch anebo se při smíchání s vodou nerozbita z důvodu velkého vzniku tepla v důsledku reakce. Celý proces byl připraven ve skleněných nádobách, kam byly umístěny vzorky pro zkoušení.

- Prepreg s uhlíkovými vlákny

Tab. 13 Naměřené a zpracované výsledky z ohybové zkoušky 13

n=5	E_o [MPa]	σ_{max} [MPa]	F_{max} [N]	ϵ_y [mm]	ϵ_y [%]	W [J]	h [mm]	b [mm]
1	28 300	559	261	13	2,3	1,95	1,92	15,19
2	25 800	517	258	12,4	2,3	1,82	1,99	15,13
3	26 200	494	244	11,3	2,1	1,54	1,98	15,13
4	22 800	464	254	11,8	2,3	1,67	2,06	15,48
5	26 700	508	249	12,1	2,2	1,7	1,93	15,75
\bar{x}	26 000	509	253	12,1	2,2	1,73	1,976	15,34
$S_{\bar{x}}$	1 980	34,8	6,89	0,6	0,1	0,16	0,06	0,3
$v_{\bar{x}}$ [%]	7,65	6,84	2,72	5,29	4,48	9	2,83	1,78
u_a	1 256,11	21,72	4,28	0,40	0,06	0,10	0,04	0,17



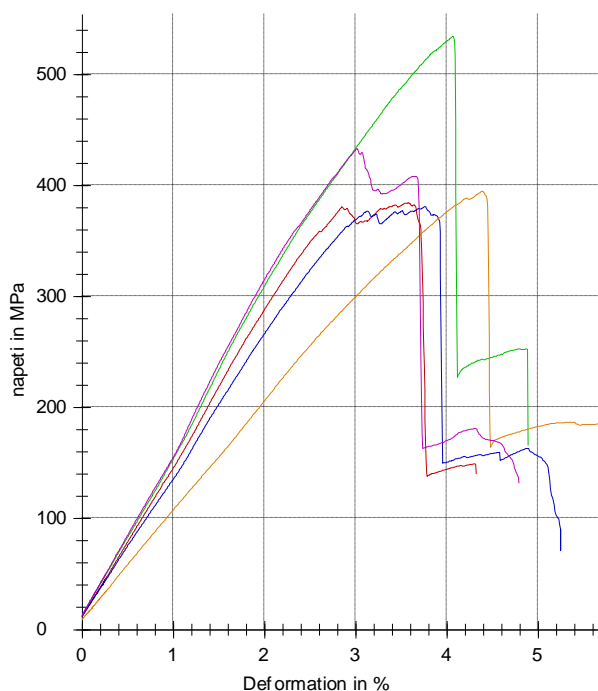
Obrázek 32 Průběh ohybového napětí v závislosti na deformaci pro tělíška 13

U tohoto materiálu není pozorován zásadní změna mechanických vlastností v ohybu. Velikost modulu pružnosti je $26\,000 \pm 1\,980$ MPa, maximální napětí $509 \pm 38,8$ MPa, maximální síla $253 \pm 6,89$ N, poměrová deformace je $12,1 \pm 0,6$ mm a v procentech je $2,2 \pm 0,1$ % a vykonaná práce je $1,73 \pm 0,16$ J.

- **Prepreg se skleněnými vlákny**

Tab. 14 Naměřené a zpracované výsledky z ohybové zkoušky 14

n=5	E_o [MPa]	σ_{max} [MPa]	F_{max} [N]	ϵ_y [mm]	ϵ_y [%]	W [J]	h [mm]	b [mm]
1	13 000	385	165	4,8	3,6	0,5	1,11	15,62
2	14 200	535	223	5,5	4,1	0,68	1,11	15,24
3	12 700	381	168	5	3,8	0,52	1,13	15,5
4	9 760	395	215	5,3	4,4	0,63	1,25	15,67
5	14 400	434	174	4,1	3	0,39	1,09	15,23
\bar{x}	12 800	426	189	4,9	3,8	0,54	1,138	15,45
$S_{\bar{x}}$	1 860	64,2	27,9	0,5	0,5	0,12	0,06	0,2
$v_{\bar{x}}$ [%]	14,48	15,08	14,74	10,4	13,83	21,2	5,64	1,34
u_a	1 163,42	40,35	17,36	0,34	0,33	0,07	0,04	0,13



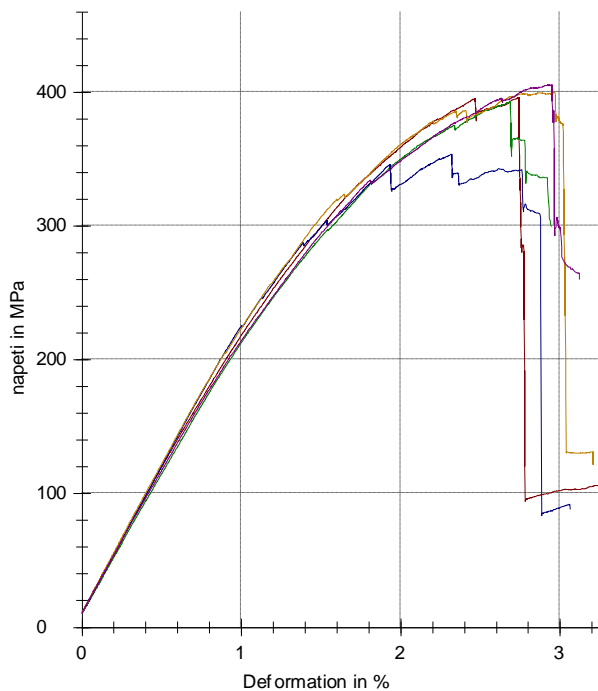
Obrázek 33 Průběh ohybového napětí v závislosti na deformaci pro tělíska 14

U těchto vzorků je viditelný pokles mechanických vlastností z důvodu velmi reaktivního kyselého činidla, v němž byli vzorky ponořeny. Avšak jsem čekala mnohem větší pokles vlastností v této látce. U druhého vzorku je v grafu vidět, že dosáhl nejvyššího maxima v této sérii. V grafu lze též vidět dvě plynulé křivky, které patří druhému a čtvrtému vzorku. Modul pružnosti je $12\,800 \pm 1\,860$ MPa, maximální napětí je $426 \pm 64,2$ MPa, maximální síla je $189 \pm 27,9$ N, poměrová deformace je $4,9 \pm 0,5$ mm a $3,8 \pm 0,5$ % a vykonaná práce je $0,54 \pm 0,12$ J.

- **Hybridní prepreg s aramid/uhlíkovými vlákny**

Tab. 15 Naměřené a zpracované výsledky z ohybové zkoušky 15

n=5	E_o [MPa]	σ_{max} [MPa]	F_{max} [N]	ϵ_y [mm]	ϵ_y [%]	W [J]	h [mm]	b [mm]
1	21 800	396	174	16	2,7	1,79	1,83	15,74
2	21 100	393	178	15,7	2,7	1,74	1,83	16,25
3	22 000	354	157	13,5	2,3	1,35	1,83	15,89
4	22 300	401	176	17,2	3	2,03	1,84	15,58
5	21 500	406	178	16,9	2,9	1,93	1,85	15,42
\bar{x}	21 800	390	173	15,9	2,7	1,77	1,836	15,78
$S_{\bar{x}}$	460	20,7	9,1	1,5	0,3	0,3	0,009	0,3
$v_{\bar{x}}$ [%]	2,11	5,32	5,24	9,18	9,51	14,65	0,49	2,01
u_a	291,99	12,98	5,56	0,91	0,17	0,16	0,01	0,20



Obrázek 34 Průběh ohybového napětí v závislosti na deformaci pro tělíška 15

U této sady zkoušených vzorků se nepozorovala zásadní změna mechanických vlastností v ohybu. Průměrná velikost modulu pružnosti je $21\,800 \pm 460$ MPa, maximální napětí je $390 \pm 20,7$ MPa, maximální síla $173 \pm 9,1$ N, poměrná deformace $15,9 \pm 1,5$ mm, což je v procentech $2,7 \pm 0,3$ %, a vykonaná práce je $1,77 \pm 0,3$ J.

Zde v této skupině lze vidět, jak minimálně z ohledu mechanických vlastností působí kyselina sírová na hybridní a uhlíkový prepreg. Opačným případem je skleněný prepreg, kde velikost ovlivnění mechanických vlastností je velká.

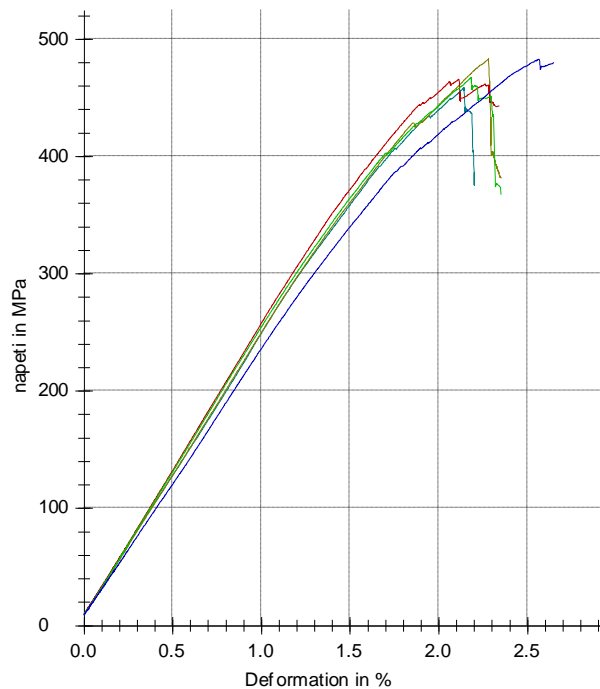
12.1.6 Motorový olej

Motorový olej se nalil do kanystru a ponořili se do něj vzorky. Vzorky z oleje se museli před měřením očistit papírovými ubrousky. Olej se velmi těžko čistil z bočních stran vzorků.

- **Prepreg s uhlíkovými vlákny**

Tab. 16 Naměřené a zpracované výsledky z ohybové zkoušky 16

n=5	E_o [MPa]	σ_{max} [MPa]	F_{max} [N]	ϵ_y [mm]	ϵ_y [%]	W [J]	h [mm]	b [mm]
1	23 800	459	230	11,7	2,1	1,5	1,96	15,68
2	24 300	466	251	12,1	2,1	1,5	1,94	15,68
3	23 700	483	229	11,6	2,3	1,7	2,01	15,43
4	24 500	467	245	11,6	2,2	1,6	2	15,71
5	22 300	483	261	13,5	2,6	2,03	2,03	15,71
\bar{x}	23 700	472	243	12,1	2,3	1,66	1,988	15,64
$S_{\bar{x}}$	880	11	13,5	0,8	0,2	0,2	0,04	0,12
$v_{\bar{x}}$ [%]	3,71	2,33	5,56	6,6	8,15	13,21	1,86	0,76
u_a	539,50	6,80	8,61	0,51	0,13	0,14	0,02	0,07



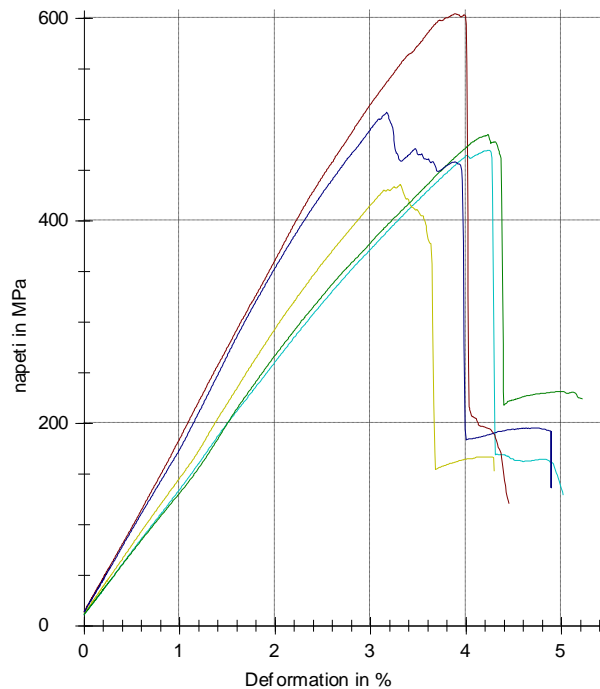
Obrázek 35 Průběh ohybového napětí v závislosti na deformaci pro tělíka 16

Zde vidíme prudký pokles modulu pružnosti, maximálního napětí a síly oproti referenčním vzorkům, na které nepůsobilo žádné agresivní prostředí. Modul pružnosti je $23\,700 \pm 880$ MPa, maximální napětí 472 ± 11 MPa, maximální síla $243 \pm 13,5$ N, poměrná deformace je $12,1 \pm 0,8$ mm a v procentech je $2,3 \pm 0,2$ %, vykonaná práce je $1,66 \pm 0,2$ J.

- **Prepreg se skleněnými vlákny**

Tab. 17 Naměřené a zpracované výsledky z ohybové zkoušky 17

n=5	E_o [MPa]	σ_{max} [MPa]	F_{max} [N]	ϵ_y [mm]	ϵ_y [%]	W [J]	h [mm]	b [mm]
1	12 400	470	226	5,3	4,2	0,68	1,19	15,29
2	13 600	436	192	4,4	3,3	0,47	1,12	15,79
3	16 700	605	230	5,5	3,9	0,71	1,06	15,21
4	12 400	485	231	5,4	4,2	0,68	1,18	15,35
5	16 200	507	199	4,4	3,2	0,47	1,08	15,1
\bar{x}	14 300	501	215	5	3,8	0,6	1,126	15,35
$S_{\bar{x}}$	2 080	63,6	18,6	0,5	0,5	0,12	0,06	0,3
$v_{\bar{x}}$ [%]	14,56	12,71	8,62	10,82	13,33	20,16	5,16	1,72
u_a	1 293,77	39,96	11,66	0,35	0,30	0,08	0,04	0,17



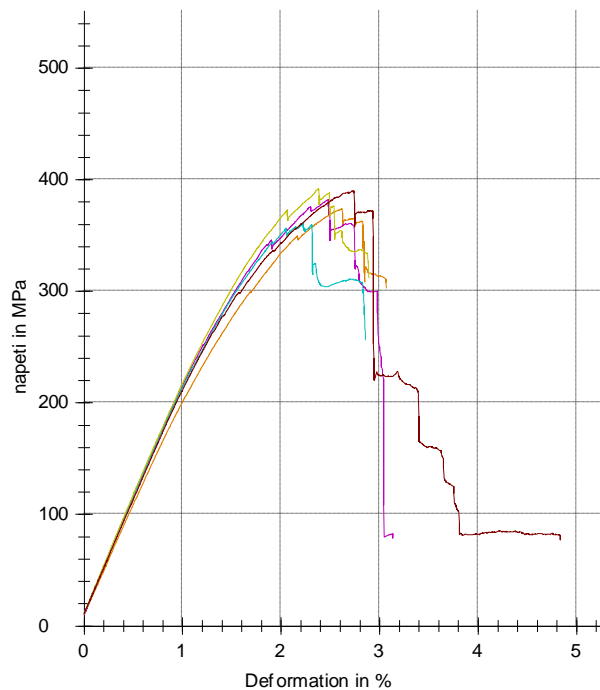
Obrázek 36 Průběh ohybového napětí v závislosti na deformaci pro tělíska 17

U skla se nepozoruje velká změna vlastností. Zajímavé je že třetí vzorek dosahuje jedno z největších napětí mezi skleněnými prepregy při ohybu a zároveň se jeví jako velmi plynule naměřený vzorek v grafu. Změnilo se, že v průměru je modul pružnosti $14\,300 \pm 2\,080$ MPa, maximální napětí $501 \pm 63,6$ MPa, maximální síla $215 \pm 18,6$ N, poměrová deformace je $5 \pm 0,5$ mm a v procentech $3,8 \pm 0,5$ %, vykolnaná práce je $0,6 \pm 0,12$ J.

- Hybridní prepreg s aramid/uhlíkovými vlákny

Tab. 18 Naměřené a zpracované výsledky z ohybové zkoušky 18

n=5	E_o [MPa]	σ_{max} [MPa]	F_{max} [N]	ϵ_y [mm]	ϵ_y [%]	W [J]	h [mm]	b [mm]
1	19 900	374	182	14,8	2,6	1,65	1,89	16,32
2	21 300	382	173	14,1	2,5	1,49	1,88	15,33
3	21 200	361	163	12,7	2,2	1,25	1,86	15,63
4	21 500	392	172	13,6	2,4	1,39	1,87	15,01
5	20 600	390	172	15,6	2,7	1,68	1,86	15,28
\bar{x}	20 900	380	172	14,2	2,5	1,49	1,872	15,51
$S_{\bar{x}}$	674	12,6	6,7	1,1	0,2	0,18	0,013	0,5
$v_{\bar{x}}$ [%]	3,22	3,32	3,89	7,78	7,91	12	0,7	3,23
u_a	408,17	7,95	4,22	0,70	0,12	0,11	0,01	0,31



Obrázek 37 Průběh ohybového napětí v závislosti na deformaci pro tělíška 18

Zde u hybridního prepregu není v grafu ani v tabulce není zajímavá hodnota u určitého vzorku. Hybridní prepreg není zásadně ovlivněn olejem pouze některé hodnoty jsou velmi málo ovlivněny. Hodnoty v průměru jsou naměřeny v tomto pořadí: modul pružnosti $20\,900 \pm 674$ MPa, maximální napětí $380 \pm 12,6$ MPa, maximální síla $172 \pm 6,7$ N, poměrová deformace $14,2 \pm 1,1$ mm a v procentech $2,5 \pm 0,2$ %, vykonaná práce $1,49 \pm 0,18$.

U oleje mě zaujalo velké oslabení uhlíkových vláken v oleji. Zajímavé je, ale v kombinaci s aramidem se vlastnosti byli stejné jako referenční vzorky hybridního prepregu. Z tohoto pohledu by bylo zajímavé prozkoumat více hybridních prepregů, které kombinují uhlík a jiný materiál ve formě vláken. Zajímavé by to bylo se skleněnými vlákny, protože stejně jako hybridní prepreg si zachoval své mechanické vlastnosti v ohybu.

12.2 Tahová zkouška

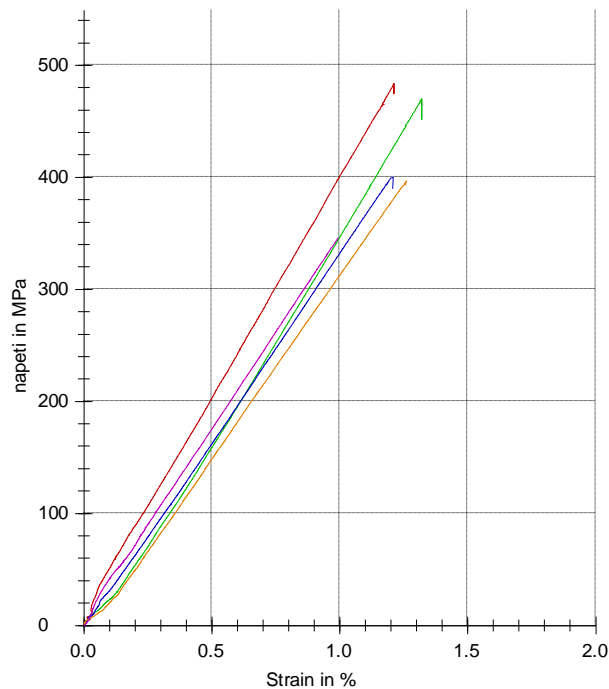
U této zkoušky nebudu popisovat přípravu a vložení vzorků do agresivních kapalin, protože se vzorky a roztoky připravovali stejným způsobem.

12.2.1 Referenční tahová zkouška bez vlivu agresivních látek

- Prepreg s uhlíkovými vlákny

Tab. 19 Naměřené a zpracované výsledky z tahové zkoušky 1

n=5	E_t [MPa]	σ_{\max} [MPa]	F_{\max} [N]	ε_t [mm]	ε_t [%]	W [J]	h [mm]	b [mm]
1	38 861,6	483,7	13 936,3	0,6	1,2	4,28	1,94	14,85
2	34 255,3	469,8	13 919,8	0,7	1,3	4,34	1,97	15,04
3	31 598,6	399,7	11 739,8	0,6	1,2	3,52	1,97	14,91
4	32 849,9	396,8	11 755,3	0,6	1,3	3,58	1,97	15,04
5	33 881,0	345,9	10 098,4	0,5	1,0	2,53	1,95	14,97
\bar{x}	34 289,3	419,2	12 289,9	0,6	1,2	3,7	1,96	14,96
$S_{\bar{x}}$	2 756,1	57,0	1 640,0	0,1	0,1	0,7	0,01	0,08
$v_{\bar{x}}$ [%]	8,0	13,6	13,3	10,3	10,3	20,02	0,72	0,55
u_a	1 725,6	35,7	1 026,8	0,04	0,08	0,46	0,01	0,05



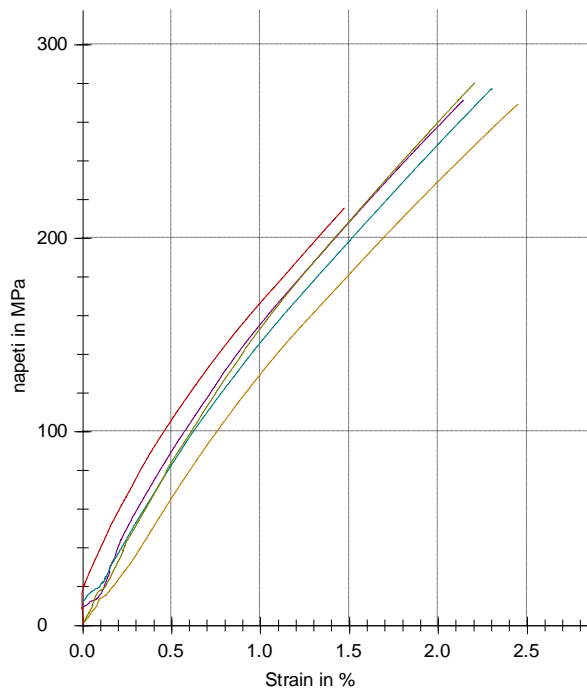
Obrázek 38 Průběh tahového napětí v závislosti na deformaci pro tělíska 1

Zajímavé je že u prvního referenčního bodu se naměřil velký modul pružnosti na rozdíl od ostatních vzorků. U většiny vzorků se prepreg zlomil ve dvou místech u úpinek, ale poslední dva vzorky se zlomily pouze ve spodní části zkušebního tělíska u spodní části úpinky. Z grafu lze vidět, jak vysoké bylo napětí a jak kolísalo při měření v tahu. V průměru se směrodatnou odchylkou je modul pružnosti $34\,289,3 \pm 2\,756$ MPa, maximální napětí $419,2 \pm 57,0$ MPa, maximální síla $12\,289 \pm 1\,640,0$ N, prodloužení $0,6 \pm 0,1$ mm, poměrné prodloužení $1,2 \pm 0,1$ % a vykonaná práce $3,65 \pm 0,73$ J.

- **Prepreg se skleněnými vlákny**

Tab. 20 Naměřené a zpracované výsledky z tahové zkoušky 2

n=5	E_t [MPa]	σ_{max} [MPa]	F_{max} [N]	ϵ_t [mm]	ϵ_t [%]	W [J]	h [mm]	b [mm]
1	11 429,5	269,2	4 606,6	1,2	2,4	3,06	1,14	15,01
2	13 482,5	271,3	4 377,3	1,1	2,1	2,67	1,08	14,94
3	13 000,9	277,3	4 512,9	1,1	2,3	2,91	1,09	14,93
4	14 319,1	280,4	4 551,1	1,1	2,2	2,80	1,09	14,89
5	12 469,3	215,6	3 535,3	0,7	1,5	1,58	1,10	14,91
\bar{x}	12 940,3	262,8	4 316,7	1,1	2,1	2,61	1,10	14,94
$S_{\bar{x}}$	1 084,3	26,8	444,9	0,2	0,4	0,59	0,02	0,05
$v_{\bar{x}}$ [%]	8,4	10,2	10,3	17,8	17,8	22,73	2,13	0,31
u_a	678,9	16,7	278,6	0,13	0,22	0,37	0,01	0,03



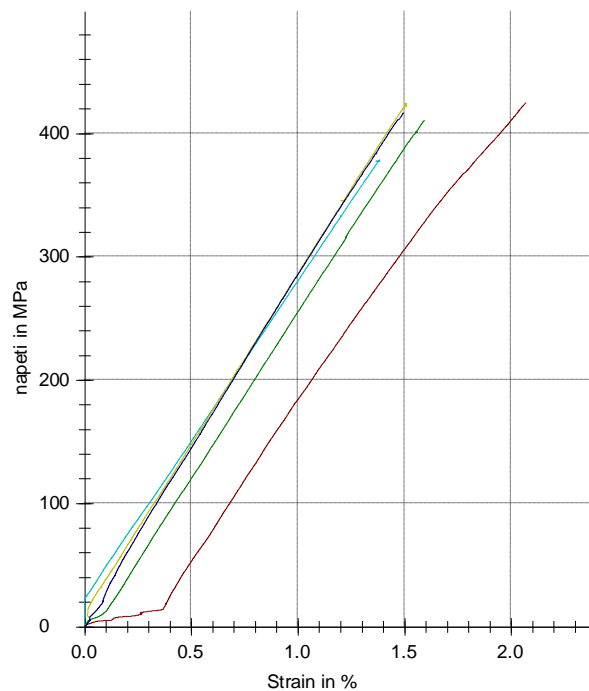
Obrázek 39 Průběh tahového napětí v závislosti na deformaci pro tělíka 2

Poslední vzorek praskl a zlomil se v půlce, jak značí graf a hodnota napětí v tabulce při nízkém napětí, protože vzorek byl z jedné strany poškozen a odlomen. První vzorek se u jedné úpinky zlomil a u druhé úpinky byl vzorek nalomený na dvou místech. U druhého a čtvrtého vzorku se choval podobně jako první vzorek, akorát místo dvou míst nalomení bylo pouze jeden náznak nalomení. U třetího vzorku se z jedné strany zlomil a z druhé strany proběhla delaminace vzorku. Naměřili se tyto hodnoty v tahové zkoušce pro modul pružnosti $12\,940 \pm 1084$ MPa, maximální napětí $262,8 \pm 26,8$ MPa, maximální sílu $4\,316,7 \pm 444,9$ N, prodloužení o délku $1,1 \pm 0,2$ mm, poměrné prodloužení $2,1 \pm 0,4$ % a pro vykonanou práci $2,61 \pm 0,59$ J.

- Hybridní prepreg s aramid/uhlíkovými vlákny

Tab. 21 Naměřené a zpracované výsledky z tahové zkoušky 3

n=5	E_t [MPa]	σ_{\max} [MPa]	F_{\max} [N]	ε_t [mm]	ε_t [%]	W [J]	h [mm]	b [mm]
1	25 873,7	379,2	10 842,7	0,7	1,4	3,98	1,90	15,05
2	27 063,8	424,6	11 764,5	0,8	1,5	4,56	1,84	15,06
3	26 789,4	425,0	11 534,1	1,0	2,1	5,41	1,82	14,91
4	22 919,8	411,0	11 643,8	0,8	1,6	4,52	1,89	14,99
5	31 461,8	416,8	11 510,3	0,7	1,5	4,41	1,84	15,01
\bar{x}	26 821,7	411,3	11 459,1	0,8	1,6	4,58	1,86	15,00
$S_{\bar{x}}$	3 070,6	18,9	359,0	0,1	0,3	0,52	0,03	0,06
$v_{\bar{x}}$ [%]	11,5	4,6	3,1	16,6	16,6	11,36	1,88	0,40
u_a	1 922,5	11,8	224,8	0,08	0,17	0,33	0,02	0,04



Obrázek 40 Průběh tahového napětí v závislosti na deformaci pro tělíka 3

Třetí vzorek pořádně nedržel v úpince a chvíli vyklouzával, než se zpevnil a naměřil se výsledek tahové zkoušky. U všech vzorků se z jedné strany zlomil a z druhé strany delaminoval, či praskal. U některých vzorků v místě zlomení ještě vlákna aramidů držela ulomený kus na zkušební tělese. Naměřil se modul pružnosti $26\,821,7 \pm 3\,070,6$ MPa, maximální napětí $411,3 \pm 18,9$ MPa, maximální síla $11\,459 \pm 359,0$ N, prodloužení tělesa o $0,8 \pm 0,1$ mm, poměrné prodloužení $1,6 \pm 0,3$ % a vykonaná práce $4,58 \pm 0,52$ J.

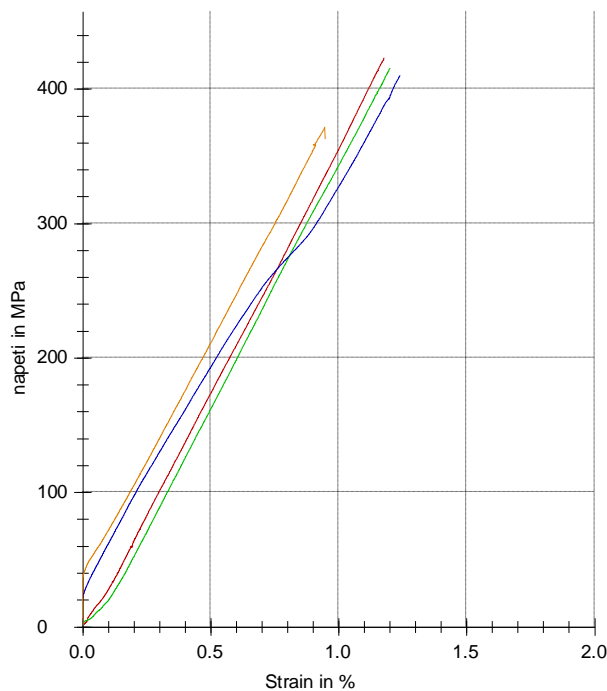
V porovnání jde za sebou u většiny hodnot uhlíkový poté následuje hybridní, a nakonec skelný prepreg. Výjimečné je, že skelný prepreg dominuje měrnému prodloužení v tahu u těchto těles a uhlíkový prepreg je zase s nejmenším měrným prodloužením. Zajímavé je, ale že největší vykonaná práci má hybridní prepreg a uhlíkový a skelný prepreg následují po něm.

12.2.2 Roztok vody v 0,5 % Incidin Rapid

- Prepreg s uhlíkovými vlákny

Tab. 22 Naměřené a zpracované výsledky z tahové zkoušky 4

n=4	E_t [MPa]	σ_{\max} [MPa]	F_{\max} [N]	ε_t [mm]	ε_t [%]	W [J]	h [mm]	b [mm]
1	33 955,1	423,6	11 910,5	0,6	1,2	3,42	1,90	14,80
2	30 202,6	415,9	11 695,3	0,6	1,2	3,37	1,92	14,85
3	35 026,1	410,3	11 724,3	0,6	1,2	3,93	1,91	14,96
4	33 040,9	371,6	11 101,7	0,5	0,9	2,86	2,02	14,79
\bar{x}	33 056,2	405,3	11 608,0	0,6	1,1	3,39	1,94	14,85
$S_{\bar{x}}$	2 068,1	23,1	350,7	0,1	0,1	0,44	0,06	0,08
$v_{\bar{x}}$ [%]	6,3	5,7	3,0	11,6	11,6	12,87	2,87	0,52
u_a	1 121,4	12,6	190,2	0,03	0,1	0,24	0,03	0,04



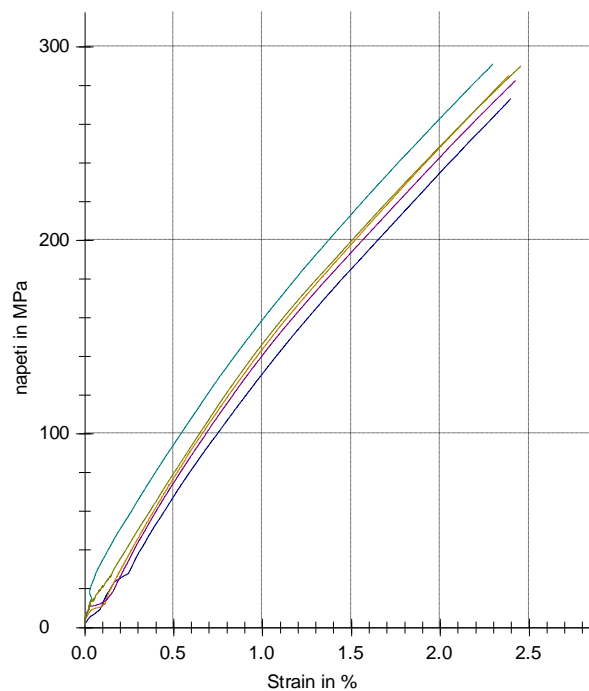
Obrázek 41 Průběh tahového napětí v závislosti na deformaci pro tělíska 4

U této série máme pouze čtyři vzorky z důvodu špatného upnutí jednoho ze vzorků a nenaměření modulu pružnosti. Všechny vzorky se přerušili na dvou místech, kromě posledního vzorku, který se přerušil pouze v jednom místě. U prepregu s uhlíkovými vlákny nastalo mírné snížení mechanických vlastností prepregu. Naměřené hodnoty pro modul pružnosti je $33\,056,2 \pm 2\,068,1$ MPa, maximální napětí v tahu $405,3 \pm 23,1$ MPa, maximální síla $11\,608,0 \pm 350,7$ N, prodloužení vzorku o $0,6 \pm 0,1$ mm, poměrné prodloužení $1,1 \pm 0,1$ % a vykonaná práce $3,39 \pm 0,44$ J.

- **Prepreg se skleněnými vlákny**

Tab. 23 Naměřené a zpracované výsledky z tahové zkoušky 5

n=5	E_t [MPa]	σ_{max} [MPa]	F_{max} [N]	ϵ_t [mm]	ϵ_t [%]	W [J]	h [mm]	b [mm]
1	11 010,6	273,3	4 467,8	1,2	2,4	2,88	1,09	15,00
2	13 662,7	285,1	4 587,3	1,2	2,4	3,02	1,09	14,76
3	13 450,7	282,6	4 581,5	1,2	2,4	3,06	1,10	14,74
4	13 070,7	291,2	4 728,7	1,1	2,3	3,15	1,09	14,90
5	13 596,2	289,9	4 715,9	1,2	2,5	3,26	1,10	14,79
\bar{x}	12 958,2	284,4	4 616,2	1,2	2,4	3,07	1,09	14,84
$S_{\bar{x}}$	1 112,6	7,1	108,0	0,0	0,1	0,14	0,01	0,11
$v_{\bar{x}}$ [%]	8,6	2,5	2,3	2,5	2,5	4,62	0,50	0,74
u_d	696,6	4,5	67,6	0,03	0,04	0,09	0,00	0,07



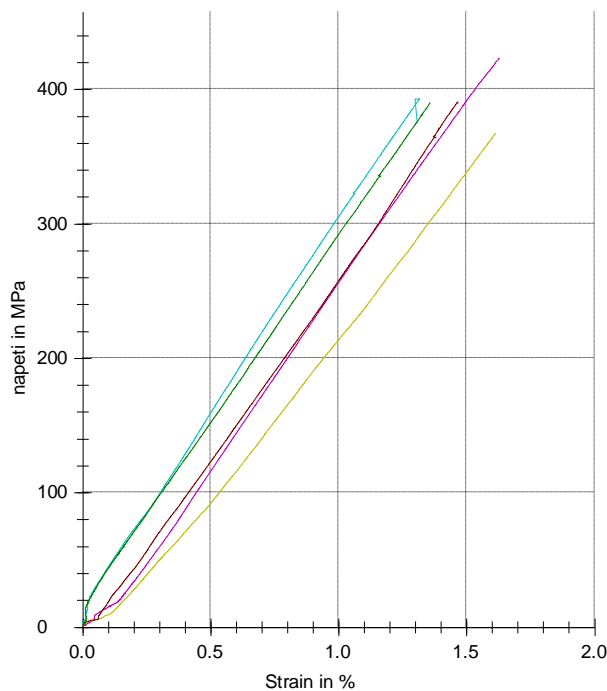
Obrázek 42 Průběh tahového napětí v závislosti na deformaci pro tělíka 5

U prepregu plněného sklem je pouze u jednoho vzorku na jedné straně přetržení a na druhé straně delaminace vzorku, jinak se všechny přetrhly na obou stranách. U tohoto prepregu není velká změna u naměřených hodnot od referenčních vzorků. Naměřeno pro modul pružnosti je $12\,958,2 \pm 1\,112,6$ MPa, maximální napětí $284,4 \pm 7,1$ MPa, maximální síla $4\,616,2 \pm 108,0$ MPa, prodloužení vzorku $1,2 \pm 0,01$ mm, poměrné prodloužení $2,4 \pm 0,1$ % a vykonaná práce $3,07 \pm 0,14$ J.

- **Hybridní prepreg s aramid/uhlíkovými vlákny**

Tab. 24 Naměřené a zpracované výsledky z tahové zkoušky 6

n=5	E_t [MPa]	σ_{\max} [MPa]	F_{\max} [N]	ε_t [mm]	ε_t [%]	W [J]	h [mm]	b [mm]
1	26 758,0	423,6	11 448,4	0,8	1,6	4,50	1,82	14,85
2	27 676,9	393,1	10 827,8	0,6	1,3	3,62	1,85	14,89
3	21 452,0	367,7	9 716,2	0,8	1,6	3,63	1,84	14,36
4	25 600,2	391,0	10 893,1	0,7	1,5	3,83	1,86	14,98
5	27 863,5	390,3	10 818,1	0,7	1,4	3,81	1,86	14,90
\bar{x}	25 870,1	393,1	10 740,7	0,7	1,5	3,88	1,85	14,80
$S_{\bar{x}}$	2 627,7	19,9	630,0	0,1	0,1	0,36	0,02	0,25
$v_{\bar{x}}$ [%]	10,2	5,1	5,9	10,1	10,1	9,34	0,91	1,68
u_a	1 645,2	12,5	394,4	0,05	0,08	0,23	0,01	0,16



Obrázek 43 Průběh tahového napětí v závislosti na deformaci pro tělíska 6

První vzorek dosahuje nejvyšších naměřených hodnot v tahu. Nejčastěji sehybridní prepreg utrl v jednom nebo ve dvou místech upnutí, často nebyla separace úplná, protože vzorek drželi pohromadě aramidová vlákna. U těchto vzorků nastala velká změna mechanických vlastností ve srovnání s referenčními vzorky. Hodnoty naměřené zkouškou je modul pružnosti $25\,870 \pm 2\,627,1$ MPa, maximální napětí $393,1 \pm 19,9$ MPa, maximální síla v tahu $10\,740,7 \pm 630,0$ N, prodloužení vzorku o $0,7 \pm 0,1$ mm, poměrné prodloužení $1,5 \pm 0,1$ % a vykonaná práce $3,88 \pm 0,36$ J.

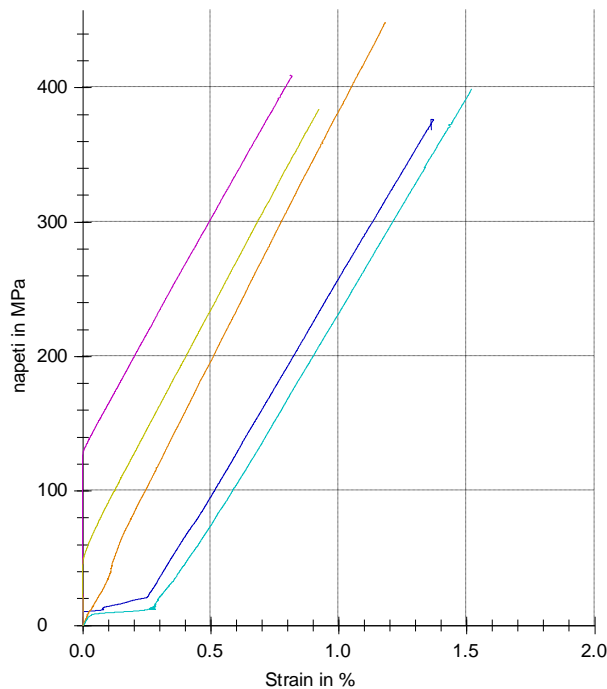
Všechny výsledky se podobají výsledkům referenčních vzorků. Rozdílem je zvednutí vykonané práce ve skelném prepregu, kde došlo ke zvýšení hodnoty, ale ve srovnání s jinými vzorky nedostačuje. Hybridní vlákno mělo velké snížení modulu pružnosti, ale jako skelný prepreg nemá to zásadní vliv na dané vzorky.

12.2.3 Roztok vody s 20 % soli

- Prepreg s uhlíkovými vlákny

Tab. 25 Naměřené a zpracované výsledky z tahové zkoušky 7

n=5	E_t [MPa]	σ_{\max} [MPa]	F_{\max} [N]	ϵ_t [mm]	ϵ_t [%]	W [J]	h [mm]	b [mm]
1	30 897,8	376,5	11 112,3	0,7	1,4	3,25	1,99	14,83
2	42 344,0	448,5	12 452,4	0,6	1,2	3,76	1,92	14,46
3	34 593,4	409,4	12 157,9	0,4	0,8	3,27	1,98	15,00
4	29 271,9	399,1	11 836,7	0,8	1,5	3,75	1,98	14,98
5	36 611,5	384,1	10 995,8	0,5	0,9	2,92	1,91	14,99
\bar{x}	34 743,7	403,5	11 711,0	0,6	1,2	3,39	1,96	14,85
$S_{\bar{x}}$	5 148,0	28,2	639,4	0,1	0,3	0,36	0,04	0,23
$v_{\bar{x}}$ [%]	14,8	7,0	5,5	25,3	25,3	10,65	1,93	1,55
u_a	3 223,2	17,7	400,3	0,10	0,19	0,23	0,02	0,14



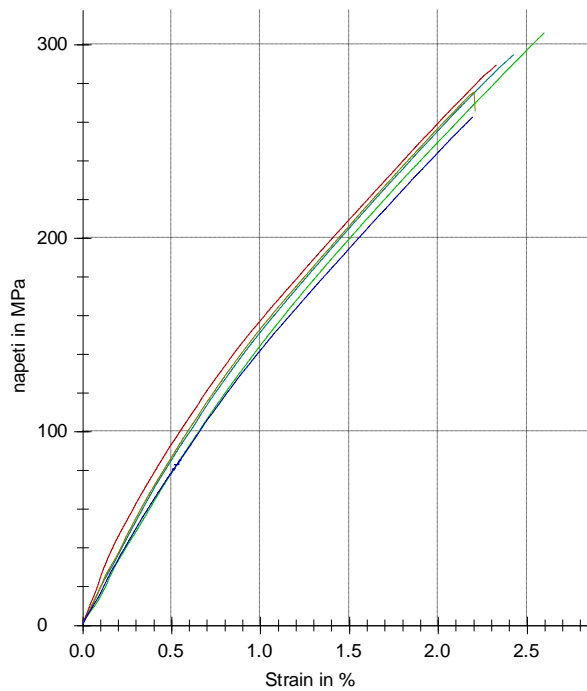
Obrázek 44 Průběh tahového napětí v závislosti na deformaci pro tělíka 7

Zde můžeme vidět v grafu, jak mechanické upnutí velmi špatně upínalo vzorky. U vzorků se pozorovalo mírné snížení mechanických vlastností oproti referenčním vzorkům. Téměř všechny se ulomili na obou stranách kromě posledního vzorku, který se ulomil pouze na jedné straně. Z průměrných hodnot se zjistil modul pružnosti $34\,743,7 \pm 5\,148,0$ MPa, maximální napětí v tahu $403,5 \pm 28,2$ MPa, maximální sílu $11\,711,0 \pm 639,4$ N, největší prodloužení vzorku o $0,6 \pm 0,1$ mm, poměrné prodloužení $1,2 \pm 0,3$ % a vykonaná práce $3,39 \pm 0,36$ J.

- **Prepreg se skleněnými vlákny**

Tab. 26 Naměřené a zpracované výsledky z tahové zkoušky 8

n=5	E_t [MPa]	σ_{max} [MPa]	F_{max} [N]	ϵ_t [mm]	ϵ_t [%]	W [J]	h [mm]	b [mm]
1	13 267,4	294,9	4 812,1	1,2	2,4	3,17	1,09	14,97
2	13 353,0	275,4	4 526,5	1,1	2,2	2,71	1,10	14,94
3	12 924,9	289,7	4 676,3	1,1	2,3	3,01	1,09	14,81
4	13 304,1	306,2	5 012,8	1,2	2,6	3,47	1,09	15,02
5	12 697,7	262,7	4 259,2	1,1	2,2	2,49	1,10	14,74
\bar{x}	13 109,4	285,8	4 657,4	1,1	2,3	2,97	1,09	14,90
$S_{\bar{x}}$	285,4	17,0	285,6	0,1	0,2	0,38	0,01	0,12
$v_{\bar{x}}$ [%]	2,2	6,0	6,1	7,1	7,1	12,85	0,50	0,78
u_a	178,7	10,6	178,8	0,04	0,11	0,24	0,00	0,07



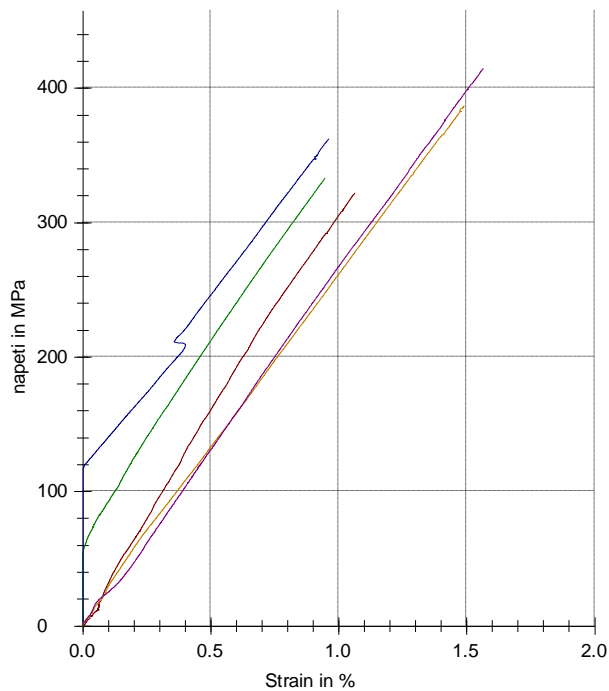
Obrázek 45 Průběh tahového napětí v závislosti na deformaci pro tělíka 8

Modul pružnosti, maximální napětí, maximální síla a vykonaná práce se zvedly naměřené hodnoty u skleného prepregu oproti referenčním vzorkům, které mají tyto hodnoty nižší. Ostatní hodnoty se zůstali stejné nebo podobné referenčním vzorkům. Tři vzorky se z jedné strany oddělily a z druhé strany delaminovali. Další vzorky se pouze zlomili uprostřed. Naměřené hodnoty jsme zprůměrovali a jsou to tyto hodnoty: modul pružnosti $13\,109,4 \pm 285,4$ MPa, maximální napětí $285,8 \pm 17,0$ MPa, maximální síla $4657,4 \pm 285,6$ N, prodloužení vzorku o $1,1 \pm 0,1$ mm, poměrné prodloužení $2,3 \pm 0,2$ % a vykonaná práce $2,79 \pm 0,38$ J.

- Hybridní prepreg s aramid/uhlíkovými vlákny

Tab. 27 Naměřené a zpracované výsledky z tahové zkoušky 9

n=5	E_t [MPa]	σ_{\max} [MPa]	F_{\max} [N]	ε_t [mm]	ε_t [%]	W [J]	h [mm]	b [mm]
1	34 416,8	322,5	8 978,5	0,5	1,1	2,48	1,85	15,05
2	31 420,8	333,3	9 430,5	0,5	0,9	2,71	1,88	15,05
3	22 068,6	362,5	10 744,8	0,5	1,0	3,26	1,98	14,97
4	25 162,7	387,2	11 477,4	0,7	1,5	4,16	1,93	14,87
5	27 368,3	414,9	11 544,4	0,8	1,6	4,33	1,86	14,96
\bar{x}	28 087,4	364,1	10 435,1	0,6	1,2	3,39	1,90	14,98
$S_{\bar{x}}$	4 911,0	38,1	1 177,2	0,1	0,3	0,84	0,05	0,07
$v_{\bar{x}}$ [%]	17,5	10,5	11,3	23,4	24,8	24,71	2,86	0,50
u_a	3 074,7	23,8	737,1	0,09	0,20	0,52	0,03	0,05



Obrázek 46 Průběh tahového napětí v závislosti na deformaci pro tělíska 9

V této sérii jde vidět především z grafu, jak se přešlo z mechanické horní úpinky na pneumatickou. V grafu jde vidět i chybu při měření modulu pružnosti, protože se vzorek při mechanickém upnutí vysouval z úpinky. První tři vzorky se zlomili pouze na jedné straně, další dva překročili maximální zatížení, ale vzorky drží na obou koncích na aramidových vláknech. Naměřené hodnoty jsou pro modul pružnosti $28\,087,4 \pm 4\,911,0$ MPa, maximální napětí $364,1 \pm 38,1$ MPa, maximální sílu $10\,435,1 \pm 1\,177,2$ N, největší prodloužení $0,6 \pm 0,1$ mm, poměrné prodloužení $1,2 \pm 0,3$ % a vykonaná práce $3,39 \pm 0,84$ J.

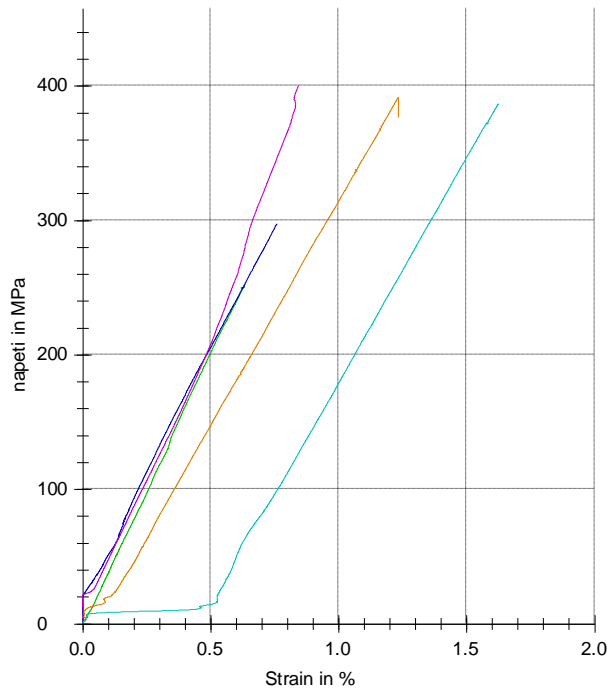
Nastali změny v mechanických vlastnostech v 20 % roztoku soli u všech vzorků. Nejmenší přesné měření je u hybridního prepregu, kde se měnila horní úpinka z mechanické na pneumatickou, ale poté se snáz měřilo, ale předtím se ještě měřila série namočená v Baccobanu. Všechny grafy se vykreslili dle předpokladů, ale zajímavé by bylo vyzkoušet vliv vrstvy soli nanesené na prepregy z důvodu toho, že sůl zlepšila pár vlastností.

12.2.4 Roztok vody v 0,5 % Baccoban

- Prepreg s uhlíkovými vlákny

Tab. 28 Naměřené a zpracované výsledky z tahové zkoušky 10

n=5	E_t [MPa]	σ_{\max} [MPa]	F_{\max} [N]	ϵ_t [mm]	ϵ_t [%]	W [J]	h [mm]	b [mm]
1	39 816,6	251,6	7 496,5	0,3	0,6	1,18	1,98	15,05
2	38 945,9	297,9	9 087,0	0,4	0,8	1,85	2,05	14,88
3	24 522,9	391,9	11 641,1	0,6	1,2	3,44	1,97	15,08
4	39 270,7	400,7	11 343,8	0,4	0,8	2,22	1,89	14,98
5	30 930,1	387,1	11 278,2	0,8	1,6	3,36	1,94	15,02
\bar{x}	34 697,2	345,8	10 169,3	0,5	1,0	2,41	1,97	15,00
$S_{\bar{x}}$	6 761,7	67,1	1 809,1	0,2	0,4	0,98	0,06	0,08
$v_{\bar{x}}$ [%]	19,5	19,4	17,8	39,9	39,9	40,54	2,98	0,52
u_a	4 233,5	42,0	1 132,6	0,13	0,25	0,61	0,04	0,05



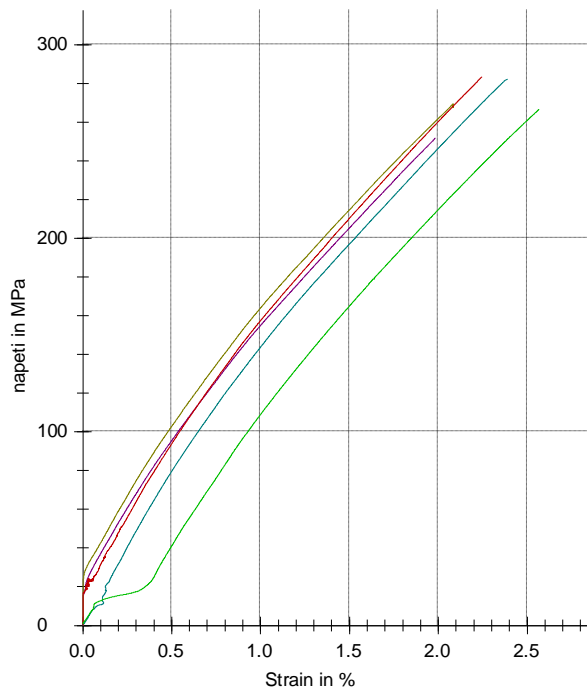
Obrázek 47 Průběh tahového napětí v závislosti na deformaci pro tělíska 10

Zde nelze pozorovat velké změny mechanických vlastností prepregu. Kromě posledního vzorku se všechny vzorky zlomili pouze v jednom místě a ten poslední na obou stranách. Velikosti naměřených hodnot jsou u modulu pružnosti $34\,697,2 \pm 6\,761,7$ MPa, maximální napětí $345,8 \pm 67,1$ MPa, maximální síly $10\,169,3 \pm 1\,809,1$ N, největšího prodloužení vzorku $0,5 \pm 0,2$ mm, poměrného prodloužení $1,0 \pm 0,4$ % a vykonané práce $2,41 \pm 0,98$ J.

- **Prepreg se skleněnými vlákny**

Tab. 29 Naměřené a zpracované výsledky z tahové zkoušky 11

n=5	E_t [MPa]	σ_{\max} [MPa]	F_{\max} [N]	ϵ_t [mm]	ϵ_t [%]	W [J]	h [mm]	b [mm]
1	12 101,3	251,7	4 234,2	1,0	2,0	2,47	1,12	15,02
2	13 200,4	282,2	4 577,5	1,2	2,4	3,05	1,08	15,02
3	12 461,5	269,3	4 369,3	1,0	2,1	2,73	1,08	15,02
4	13 012,0	283,4	4 552,8	1,1	2,2	2,95	1,09	14,74
5	14 004,5	266,6	4 568,8	1,3	2,6	2,98	1,14	15,03
\bar{x}	12 956,0	270,7	4 460,5	1,1	2,3	2,84	1,10	14,97
$S_{\bar{x}}$	731,0	13,0	152,8	0,1	0,2	0,24	0,03	0,13
$v_{\bar{x}}$ [%]	5,6	4,8	3,4	10,4	10,4	8,42	2,43	0,84
u_a	457,7	8,1	95,7	0,08	0,15	0,15	0,02	0,08



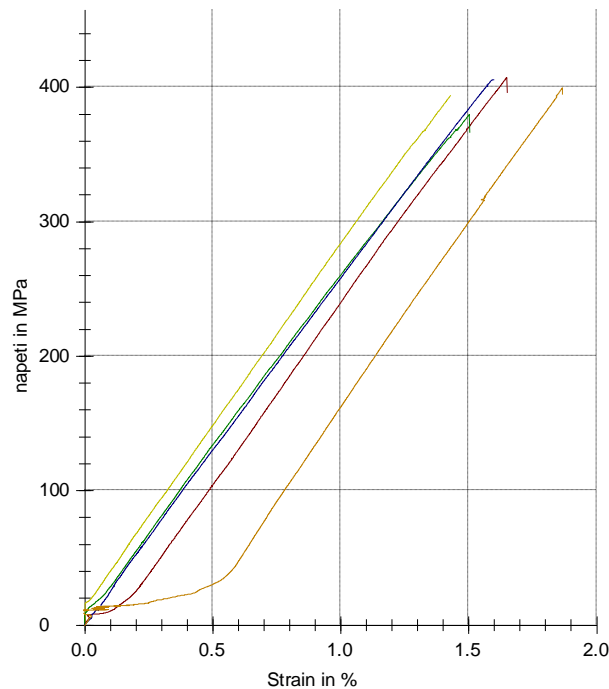
Obrázek 48 Průběh tahového napětí v závislosti na deformaci pro tělíska 11

U těchto vzorků se mírně zvedli mechanické vlastnosti prepregu. Na jedné straně se zlomili tři vzorky, druhý se pouze zlomil na půlky a čtvrtý vzorek se kromě zlomení na druhé straně delaminoval. Průměrná data z tabulky jsou pro modul pružnosti $12\,956,0 \pm 731,0$ MPa, maximální napětí $270,7 \pm 13,0$ MPa, maximální síla $4\,460,5 \pm 152,8$ N, největší prodloužení vzorku $1,1 \pm 0,1$ mm, poměrné prodloužení $2,3 \pm 0,2$ % a vykonaná práce je $2,84 \pm 0,24$ J.

- **Hybridní prepreg s aramid/uhlíkovými vlákny**

Tab. 30 Naměřené a zpracované výsledky z tahové zkoušky 12

n=5	E_t [MPa]	σ_{\max} [MPa]	F_{\max} [N]	ϵ_t [mm]	ϵ_t [%]	W [J]	h [mm]	b [mm]
1	27 500,5	394,2	10 851,5	0,7	1,4	4,06	1,85	14,88
2	26 328,6	407,5	11 453,0	0,8	1,6	4,48	1,88	14,95
3	24 871,6	379,8	10 575,4	0,8	1,5	4,10	1,85	15,05
4	26 722,9	405,5	10 909,7	0,8	1,6	4,43	1,88	14,31
5	29 186,9	399,5	10 748,3	0,9	1,9	4,02	1,88	14,31
\bar{x}	26 922,1	397,3	10 907,6	0,8	1,6	4,22	1,87	14,70
$S_{\bar{x}}$	1 585,9	11,1	330,3	0,1	0,2	0,22	0,02	0,36
$v_{\bar{x}}$ [%]	5,9	2,8	3,0	10,4	10,4	5,25	0,88	2,46
u_a	992,9	6,9	206,8	0,04	0,12	0,14	0,01	0,23



Obrázek 49 Průběh tahového napětí v závislosti na deformaci pro tělíska 12

Hybridní prepreg nezaznamenal zásadní změnu mechanických vlastností v roztoku Baccobanu. Tři vzorky se na jedné straně zlomily a na druhé straně se částečně delaminovaly, rozdílem je druhý, který se zlomil na obou stranách, a čtvrtý vzorek, který se pouze zlomil na jedné straně. Naměřeno je modul pružnosti $26\,922 \pm 1\,585,9$ MPa, maximální napětí $397,3 \pm 11,7$ MPa, maximální síla $10\,907,6 \pm 330,3$ N, prodloužení vzorku o $0,8 \pm 0,1$ mm, poměrné prodloužení $1,6 \pm 0,2$ % a vykonané práce $4,22 \pm 0,22$ J.

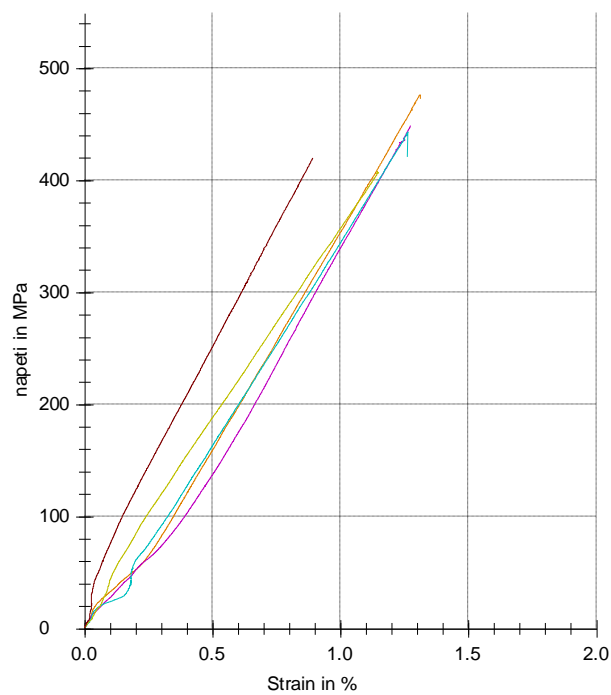
U této agresivní látky jde pozorovat pouze počáteční problémy s mechanickou úpínkou, kde nám vzorky začínali vyklouzávat nejvíce je to patrné v posledním grafu ve spodní části tahové křivky.

12.2.5 Roztok 20 % kyseliny sírové

- Prepreg s uhlíkovými vlákny

Tab. 31 Naměřené a zpracované výsledky z tahové zkoušky 13

n=5	E_t [MPa]	σ_{\max} [MPa]	F_{\max} [N]	ϵ_t [mm]	ϵ_t [%]	W [J]	h [mm]	b [mm]
1	38 276,2	476,7	13 988,1	0,6	1,3	4,15	1,96	14,97
2	36 105,6	449,3	12 872,5	0,6	1,3	3,57	1,91	15,00
3	35 918,9	443,4	12 884,8	0,6	1,3	3,75	1,94	14,98
4	33 064,1	408,4	11 761,9	0,5	1,1	3,34	1,92	15,00
5	42 891,7	420,3	11 987,3	0,4	0,9	2,78	1,90	15,01
\bar{x}	37 251,3	439,6	12 698,9	0,6	1,2	3,52	1,93	14,99
$S_{\bar{x}}$	3 656,7	26,6	881,9	0,1	0,2	0,51	0,02	0,02
$v_{\bar{x}}$ [%]	9,8	6,1	6,9	14,5	14,5	14,45	1,25	0,11
u_a	2 289,4	16,7	552,2	0,07	0,11	0,32	0,02	0,01



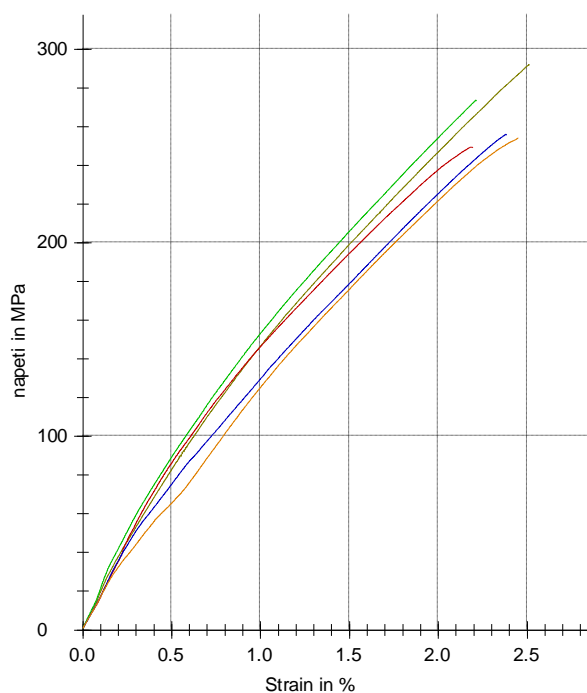
Obrázek 50 Průběh tahového napětí v závislosti na deformaci pro tělíska 13

Kyseliny sírová zásadně neovlivnila prepreg s uhlíkovým vláknem, jediné, co trochu zvedá průměr modulu pružnosti je poslední vzorek, který i když má normální čáru v grafu tak nám asi udělal chybu přístroj. První vzorek se zlomil s obou stran, druhý a poslední vzorek se přetrhl z jedné strany, třetí vzorek kromě přetržení se delaminoval a uprostřed byl naprasklý. Čtvrtý vzorek je z jedné strany zlomený a druhé strany nalomený. Změřené hodnoty jsou pro modul pružnosti $37\,251,3 \pm 3656,7$ MPa, maximální napětí $439,6 \pm 26,6$ MPa, maximální síla $12\,698,9 \pm 881,9$ N, největší prodloužení $0,6 \pm 0,1$ mm, poměrné prodloužení $1,2 \pm 0,2$ % a vykonaná práce $3,52 \pm 0,51$ J.

- **Prepreg se skleněnými vlákny**

Tab. 32 Naměřené a zpracované výsledky z tahové zkoušky 14

n=5	E_t [MPa]	σ_{max} [MPa]	F_{max} [N]	ϵ_t [mm]	ϵ_t [%]	W [J]	h [mm]	b [mm]
1	12 888,2	292,0	4 783,4	1,2	2,5	3,28	1,10	14,89
2	12 234,3	249,5	4 266,6	1,1	2,2	2,64	1,14	15,00
3	12 900,2	273,8	4 510,9	1,1	2,2	2,74	1,10	14,98
4	11 046,8	256,1	4 255,4	1,1	2,4	2,74	1,11	14,97
5	10 340,3	254,2	4 296,6	1,2	2,5	2,84	1,13	14,96
\bar{x}	11 882,0	265,1	4 422,6	1,1	2,3	2,85	1,12	14,96
$S_{\bar{x}}$	1 145,4	17,6	227,0	0,1	0,1	0,25	0,02	0,04
$v_{\bar{x}}$ [%]	9,6	6,7	5,1	6,1	6,1	8,80	1,63	0,28
u_a	717,1	11,0	142,1	0,04	0,10	0,16	0,01	0,03



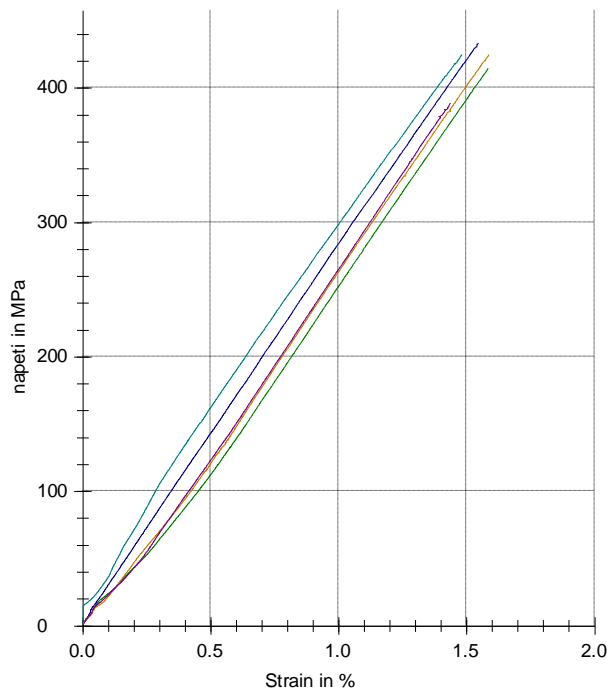
Obrázek 51 Průběh ohybového napětí v závislosti na deformaci pro tělíska 14

Kromě zásadního snížení modulu pružnosti díky poslednímu vzorku se nezměnili mechanické vlastnosti této skupiny vzorků vůči referenčním hodnotám skelného prepregu. Vždy se zlomek na jedné straně zlomil, kromě druhého vzorku, který se přetrhl napůl. Z druhé strany se u prvního vzorku delaminovalo spolu s nalomením, u tří vzorků bylo z druhé strany pouze nalomení bez delaminace. Průměrné hodnoty se směrodatnou odchylkou jsou pro modul pružnosti $11\,882,0 \pm 1\,145,4$ MPa, maximální napětí $265,1 \pm 17,6$ MPa, maximální síla $4\,422,6 \pm 227,0$ N, největší prodloužení o $1,1 \pm 0,1$ mm, poměrné prodloužení $2,3 \pm 0,1$ a vykonaná práce $2,85 \pm 0,25$ J.

- **Hybridní prepreg s aramid/uhlíkovými vlákny**

Tab. 33 Naměřené a zpracované výsledky z tahové zkoušky 15

n=5	E_t [MPa]	σ_{\max} [MPa]	F_{\max} [N]	ε_t [mm]	ε_t [%]	W [J]	h [mm]	b [mm]
1	26 099,8	414,8	11 402,6	0,8	1,6	4,15	1,83	15,02
2	27 792,7	433,4	12 091,4	0,7	1,5	4,55	1,86	15,00
3	27 310,8	424,6	12 195,3	0,8	1,6	4,52	1,87	15,36
4	27 404,7	388,8	10 710,6	0,7	1,4	3,56	1,84	14,97
5	27 709,1	425,2	11 656,1	0,7	1,5	4,40	1,83	14,98
\bar{x}	27 263,4	417,4	11 611,2	0,7	1,5	4,23	1,85	15,07
$S_{\bar{x}}$	681,0	17,2	597,6	0,01	0,1	0,41	0,02	0,17
$v_{\bar{x}}$ [%]	2,5	4,1	5,2	4,3	4,3	9,63	0,98	1,10
u_a	426,4	10,8	374,1	0,04	0,05	0,26	0,01	0,10



Obrázek 52 Průběh tahového napětí v závislosti na deformaci pro tělíska 15

Z pohledu mechanických vlastností se hodnoty podobají referenčním hodnotám pro aramid-uhlíkový prepreg. U všech vzorků se zlomil z jedné strany, u tří vzorků se trochu nalomil z druhé strany vzorku, u druhého vzorku se druhá strana utrhla a u čtvrtého se druhý konec nebil viditelný vliv tahového stroje. U čtvrtého vzorku, ale ještě chvíli po vyndání vzorku visel zlomený konec na pár aramidových vlákních, než se přetrhl. Hodnoty pro tuto sérii vzorků jsou pro modul pružnosti $27\,263,4 \pm 681,0$ MPa, maximální napětí v tahu $417,4 \pm 17,2$ MPa, maximální síla v tahu $11\,611,2 \pm 597,6$ N, prodloužení o $0,7 \pm 0,01$ mm, poměrné prodloužení $1,5 \pm 0,1$ % a práce $4,23 \pm 0,41$ J.

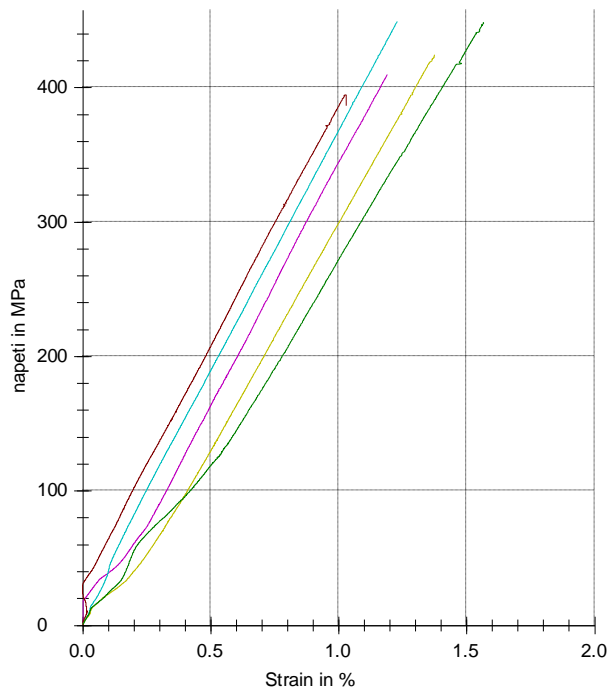
Zde můžeme vidět vliv pneumatických úpínek, které nám zlepšili průběhy grafů ve všech typech prepregů. Zajímavé je, že roztok 20 % kyseliny sírové neměl velký vliv na vzorky. Mým předpokladem bylo, že aspoň jeden typ ze zkoušených prepregů bude mít o hodně snížené mechanické vlastnosti vlivem kyseliny, což se, ale nestalo.

12.2.6 Motorový olej

- **Prepreg s uhlíkovými vlákny**

Tab. 34 Naměřené a zpracované výsledky z tahové zkoušky 16

n=5	E_t [MPa]	σ_{\max} [MPa]	F_{\max} [N]	ε_t [mm]	ε_t [%]	W [J]	h [mm]	b [mm]
1	35 353,8	409,8	11 509,4	0,6	1,2	3,22	1,87	15,02
2	35 335,8	449,2	13 052,5	0,6	1,2	3,93	1,95	14,90
3	33 286,6	424,4	12 311,6	0,7	1,4	3,80	1,93	15,03
4	36 460,1	394,7	11 602,2	0,5	1,0	3,10	1,97	14,92
5	25 533,4	448,5	12 577,5	0,8	1,6	4,47	1,90	14,76
\bar{x}	33 193,9	425,3	12 210,7	0,6	1,3	3,71	1,92	14,93
$S_{\bar{x}}$	4 433,2	23,9	654,9	0,1	0,2	0,56	0,04	0,11
$v_{\bar{x}}$ [%]	13,4	5,6	5,4	15,9	15,9	15,05	2,07	0,73
u_a	2 775,6	15,0	410,0	0,08	0,14	0,35	0,02	0,07



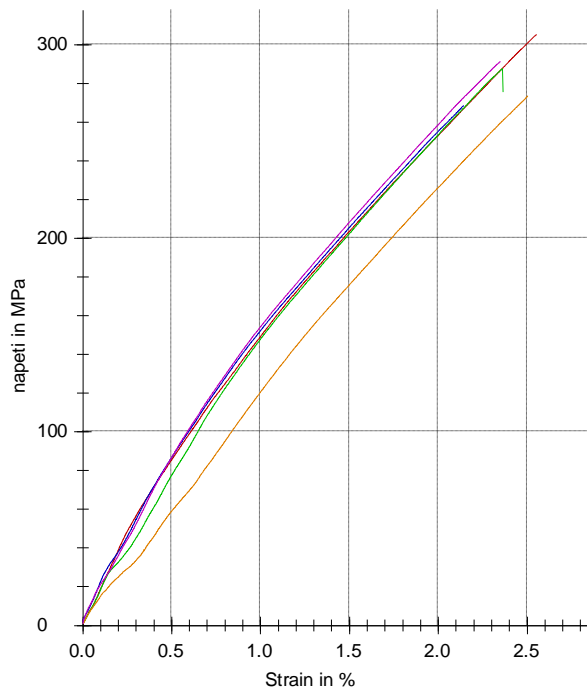
Obrázek 53 Průběh tahového napětí v závislosti na deformaci pro tělíska 16

Ve srovnání s hodnotami referenčních vzorků se mechanické vlastnosti nezměnili. Tři vzorky utržené z obou stran, z jedné strany je utržen čtvrtý vzorek a druhý vzorek z jedné strany zlomený a z druhé strany nalomený. Naměřeno pro modul pružnosti $33\,193,9 \pm 4\,433,2$ MPa, maximální napětí $425,3 \pm 23,9$ MPa, maximální síla $12\,210 \pm 654,9$ N, prodloužení $0,6 \pm 0,1$ mm, poměrné prodloužení $1,3 \pm 0,2$ % a vykonaná práce $3,71 \pm 0,56$ J.

- **Prepreg se skleněnými vlákny**

Tab. 35 Naměřené a zpracované výsledky z tahové zkoušky 17

n=5	E_t [MPa]	σ_{max} [MPa]	F_{max} [N]	ϵ_t [mm]	ϵ_t [%]	W [J]	h [mm]	b [mm]
1	12 850,6	305,2	5 013,7	1,2	2,6	3,47	1,09	15,07
2	14 275,0	287,7	4 660,6	1,1	2,4	2,93	1,08	15,00
3	13 240,2	268,5	4 398,5	1,0	2,1	2,56	1,09	15,03
4	11 547,4	273,4	4 544,8	1,2	2,5	2,88	1,10	15,11
5	13 664,7	291,3	4 749,3	1,1	2,3	3,03	1,09	14,96
\bar{x}	13 115,6	285,2	4 673,4	1,1	2,4	2,97	1,09	15,03
$S_{\bar{x}}$	1 023,6	14,7	231,2	0,1	0,2	0,33	0,01	0,06
$v_{\bar{x}}$ [%]	7,8	5,2	5,0	6,7	6,7	10,97	0,65	0,39
u_a	640,9	9,2	144,8	0,05	0,12	0,21	0,00	0,04



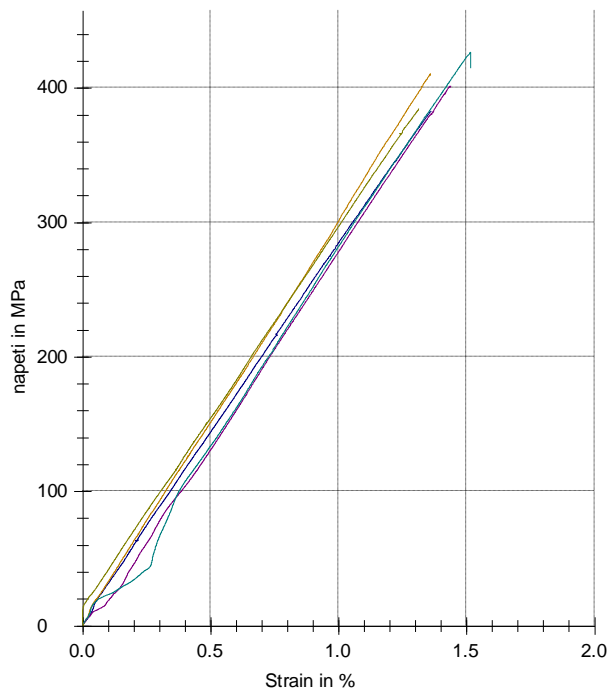
Obrázek 54 Průběh tahového napětí v závislosti na deformaci pro tělíska 17

V této sadě vzorků se některé vlastnosti mírně zlepšili nebo zhoršili vůči referenčním vzorkům ze skelného prepregu. Tři vzorky se na jedné straně velmi delaminovali a na druhé straně se přetrhy, jeden s těchto vzorků na straně delaminace ještě byl nalomený. Další dva vzorky byli zlomeny z jedné strany a jeden z nich měl na druhé straně náznak delaminace. Z grafu lze též vidět, že jeden vzorek vybočuje, protože má větší poměrné prodloužení vůči nižšímu napětí. Naměřené vzorky mají hodnoty modulu pružnosti $13\,115,6 \pm 1\,023,6$ MPa, maximální napětí $285,2 \pm 14,7$ MPa, maximální síla $4\,673 \pm 231,2$ N, prodloužení vzorku o $1,1 \pm 0,1$ mm, poměrné prodloužení $2,4 \pm 0,2$ % a vykonaná práce $2,97 \pm 0,33$ J.

- Hybridní prepreg s aramid/uhlíkovými vlákny

Tab. 36 Naměřené a zpracované výsledky z tahové zkoušky 18

n=5	E_t [MPa]	σ_{\max} [MPa]	F_{\max} [N]	ϵ_t [mm]	ϵ_t [%]	W [J]	h [mm]	b [mm]
1	27 763,9	383,0	10 706,4	0,7	1,4	3,56	1,88	14,87
2	28 776,2	410,6	11 495,0	0,7	1,4	3,76	1,88	14,89
3	28 745,5	401,7	11 070,7	0,7	1,4	3,75	1,85	14,88
4	27 692,2	426,7	11 702,5	0,7	1,5	4,17	1,82	15,07
5	28 010,9	384,7	10 734,7	0,6	1,3	3,51	1,87	14,92
\bar{x}	28 197,7	401,3	11 141,8	0,7	1,4	3,75	1,86	14,93
$S_{\bar{x}}$	527,6	18,3	447,1	0,01	0,1	0,26	0,03	0,08
$v_{\bar{x}}$ [%]	1,9	4,6	4,0	5,7	5,7	6,88	1,37	0,55
u_a	330,3	11,5	279,9	0,03	0,04	0,16	0,02	0,05



Obrázek 55 Průběh tahového napětí v závislosti na deformaci pro tělíska 18

Většina hodnot vůči referenčním vzorkům zůstala velmi podobná, a ten který se liší nejvíce je vykonaná práce, kde se snížila její hodnota vůči referenční vykonané práci. Nejvíce vzorků se zlomilo z jedné strany, a kromě prvního vzorku, který visí na vláknech aramidu. Na začátku vykreslení grafu jsou čáry nepravidelné nejspíše z důvodu špatného upnutí ve stroji. Naměřené je modul pružnosti $28\,179,7 \pm 527,6$ MPa, maximální napětí $401,3 \pm 18,3$ MPa, maximální síla $11\,141,8 \pm 447,1$ N, prodloužení $0,7 \pm 0,01$ mm, poměrné prodloužení $1,4 \pm 0,1$ % a vykonaná práce $3,75 \pm 0,26$ J.

Motorový olej v tahu neovlivnil zásadně mechanické vlastnosti v porovnání vůči referenčním vzorkům. Očekáváním bylo, že jeden materiál alespoň zmenší nebo zvětší své mechanické vlastnosti, které se, avšak téměř vůbec nezměnili vůči referenčním vzorkům. V grafech lze občas ze začátku vidět chvění, které mohlo být způsobeno jak vnitřní strukturo prepregu nebo okolními nepředvídatelnými podmínkami okolí.

13 DISKUZE

V ohybové zkoušce se nejvíce osvědčil hybridní prepreg plněný aramido-uhlíkovými vlákny. V tomto prepregu téměř vůbec nepoklesly mechanické vlastnosti, které se srovnávaly s referenčními vzorky. Největší pokles se zaznamenal u 20 % roztoku soli, kde poklesly vlastnosti o 12 %, a motorovém oleji, kde je pokles o 11 %. U uhlíkového prepregu je pokles velmi podobný. V motorovém oleji uhlíkový prepreg poklesl vlastností o 10 % a v roztoku soli o 13 %. Zajímavé je, že spousta článků uvádí pokles většinou v rozmezí 15–20 %. Do budoucna by bylo vhodné detailnější prozkoumání vzorků namočených v motorovém oleji a 20 % roztoku soli s více vzorky od těchto typů prepregů. U prepregu plněného sklem se snížily mechanické vlastnosti o 9 % v roztoku kyseliny sírové. U skleněných prepregů, které byly ponořeny do kyseliny sírové se velmi často vyskytovaly snížení vlastností nad 10 %. Další otázkou zůstává, proč nám zruřověla pryskyřice v tomto roztoku. Zruřování jsme si povšimli i u hybridního prepregu. U uhlíkového prepregu si nemůžeme být jistí z důvodu velmi tmavých uhlíkových vláken.

U tahové zkoušky mě nejvíce zaujalo, že největší snížení vlastností proběhlo u uhlíkového vlákna pro látky Incidin rapid a Bacoban, který byl v koncentraci 0,5 %. U Incidinu rapidu se vlastnosti snížili o 5 %, což už je větší pokles než očekávaný. U Bacobanu se snížili mechanické vlastnosti v tahu až o 17 %, což znamená, že by se neměl používat na čištění ploch, které jsou plněné uhlíkovým vláknem. Pro potvrzení by se mohlo provést rozsáhlejší zkoumání v těchto dvou kapalinách. Nejvíce ve skelné a hybridním prepregu působily tyto agresivní prostředí: Incidin rapid, roztok 20 % soli a motorový olej. U skelného prepregu Incidin snížil vlastnosti o 9 %, u roztoku soli o 14 % a u motorového oleje o 8 %. Kyselina sírové sice v tahu oslabila mechanické vlastnosti o 5 %, ale nesmí se zapomínat na ostatní agresivní prostředí. Především se opomíjejí čistící prostředky a jejich vliv na kompozitní plochy. Hybridní prepreg vyšel velmi podivně, protože místo aby se snížili vlastnosti, tak se zvedli v Incidinu o 13 %, v roztoku soli o 6 % a motorovém oleji o 8 %. V budoucnu bych tahovou zkoušku k hybridnímu prepregu znovu otestovala z důvodu zajímavých výsledků.

ZÁVĚR

V teoretické části naší práce jsme se zabývali základními vlastnostmi kompozitních materiálů, rozdělením na velikosti plniva v kompozitu a používanými materiály na matici kompozitů. Poté jsme se zaměřili v kapitole nazvané polymerní kompozice na typy polymerních matic, typy tkanin a jejich materiálu. Popsán byl v základu i prepreg a v té návaznosti mechanické a chemické vlastnosti prepregů spolu s vadami kompozitních materiálů. V následující části jsme definovali změnu vlastností vůči vlhkému prostředí, protože k agresivním látkám působící na prepreg, neexistuje velmi mnoho ověřených zdrojů, ze kterých by se dalo čerpat. V této části jsme se také zabývali základními statickými zkouškami jako je tahová a ohybová zkouška. Do této části jsme uvedli pár norem ke zkoušení kompozitních materiálů.

V experimentální části jsme popsali přípravu odformování formy a vlastnosti typu pryskyřice použité v prepregu. Po přípravě jsme si dali za úkol najít pět agresivních látek, které by mohly ovlivnit mechanické vlastnosti prepregů. O těchto látkách jsme si následně z materiálových listů a z běžného života zjistili jejich základní vlastnosti i vliv na nejbližší materiál, k našim kompozitům. Po zhotovení prepregů v autoklávu se odvezli k nařezání vodním paprskem na zkušební vzorky pro ohybovou a tahovou zkoušku. Po nařezání se rozdělily vzorky do šesti skupin po pěti a ponořily se na dobu tří týdnů do agresivních látek. Po této době se vzorky vytáhly a vyčistily tak, aby se mohly provést plánované zkoušky.

Realizovala se třibodová ohybová zkouška dle normy. Zjistilo se, že uhlíkový a hybridní prepreg jsou velmi podobně ovlivnitelné stejnými látkami, což je motorový olej a 20 % roztok soli ve vodném prostředí. Pro uhlíkový prepreg, který byl ponořený v motorovém oleji je snížení vlastností o 10 % a v roztoku soli je pokles mechanických vlastností v ohybu o 13 %. V hybridním prepregu ovlivnil vlastnosti motorový olej o 11 % a v roztoku soli o 12 %. Při bližším zkoumání skelného prepregu vyšlo, že významný pokles vlastností nastal pouze v 20 % roztoku kyseliny sírové ve vodě. Tohle pozorování bychom v budoucnu rádi provedli více vzorky, pouze v těchto agresivních kapalinách. Avšak nejvíce bychom se zaměřili na další výzkum na hybridní prepreg aramid-uhlík z důvodu velmi mála informací v této oblasti.

V tahové zkoušce nás zaujalo, že v prepregu s uhlíkovým vláknem se nejvíce na snížení mechanických vlastností v tahu podílel Incidin Rapid a Bacoban, což jsou časté přípravky používané v lékařství. Bacoban snížil vlastnosti v uhlíkovém prepregu o 17 %. Tato hodnota

je velmi vysoká za tři týdny, proto by v budoucnu bylo zajímavé se hlouběji podívat, zda by mohl způsobit rychlejší nutnost výměny předmětů, které obsahují převažující prvek uhlíků. Incidin Rapid ovlivňuje snížením vlastností pouze o 5 %, což, v daném použití není v malém množství ovlivnitelné. U skelného prepregu se snížili vlastnosti u Incidinu o 9 %, v roztoku soli o 14 % a v motorovém oleji o 8 %. Hybridní prepreg nám říká, že se nám hodnoty v tahu zlepšili v Incidinu o 13 %, v roztoku soli o 6 % a v motorovém oleji o 8 %.

Jedna drobná optická nesrovnalost se vyskytla u kyseliny sírové, kde nám zružověla pryskyřice. Povšimli jsme si toho nejdříve u skelného prepregu, ale když jsme zkoumali další prepregy, tak jsme si všimli narůžovělé barvy i u hybridního prepregu. V uhlíkovém prepregu to nemůžeme zaznamenat z důvodu tmavě zabarvených vláken.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

1. BARBERO, Ever J. *Introduction To Composite Materials Design*, 3rd ed. Boca Raton : CRC Press, Taylor & Francis Group, CRC Press is an imprint of the Taylor & Francis Group an informa business, 2018. 9781138196803.
2. ŠUBA, Oldřich. *Mechanika polymerů a kompozitů*. Zlín : Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2011. 9788074540158.
3. GOTTFRIED, W. Ehrenstain. *Polymerní kompozitní materiály*. Praha : Scientia, 2009. str. 351. ISBN 978-80-86960-29-6.
4. Duo ZHANG, Jing YU, Haoliang WU, Beata JAWORSKA, Brian R. ELLIS, Victor C. LI. *Discontinuous micro-fibers as intrinsic reinforcement for ductile Engineered Cementitious Composites (ECC)*.
5. J. JANOVEC, J. CEJPL, J. STEIDL. *Perspektivní Materiály*. Praha : Vydavatelství ČVUT, 2001.
6. Dipen Kumar RAJAK, Durgesh D. PAGAR, Pradeep L. MENEZES, Emanoil LINUL. *Fiber Reinforced Polymer Composites: Manufacturing, Properties, and Applications*. MDPI. [Online] Polymers, 12. srpen 2019. [Citace: 12. únor 2024.] <https://www.mdpi.com/2073-4360/11/10/1667>.
7. M. HEIDARI-RARANI, M. RAFIEE-AFARANI, A.M. ZAHEDI. *Mechanical characterization of FDM 3D printing of continuous carbon fiber reinforced PLA composites*. Composites Part B: Engineering. Composites, 2019. srpen 2019, Sv. 175, 107147.
8. Tengke YE, Yuxin XU, Jie REN. *Effects of SiC particle size on mechanical properties of SiC particle reinforced aluminum metal matrix composite*. Materials Science and Engineering: A. Materials Science and Engineering, 10. duben 2019, 753, stránky 146-155.
9. T. W. CLINE, D. HULL. *An Introduction to Composite Materials*. 3. Cambridge : Cambridge University Press, 2019. str. 20. 978-0-521-86095-6.
10. CHUNG, D.D.L. *A review of multifunctional polymer-matrix structural composites*. 2019, Sv. 160.
11. J. Jefferson ANDREW , Sivakumar M. SRINIVASAN, A. AROCKIARAJAN, Hom Nath DHAKAL. *Parameters influencing the impact response of fiber-reinforced polymer matrix composite materials: A critical review*. Composite Structures. Composite Structures, 15. srpen 2019, Sv. 224, 111007.
12. Ing. Miloš SOVA, CSc. *Popel pyrolyzovaného hybridního kompozitu v mikroskopu*. Makroskopická struktura polymerních směsí a kompozitů. 6. leden 2015.
13. LI, Longbiao. *Durability of ceramic-matrix composites*. místo neznámé : Woodhead Publishing, 2020. 9780081030226.
14. O. Gavalda DIAZ, D.A. AXINTE, P. BUTLER-SMITH, D. NOVOVIC. *On understanding the microstructure of SiC/SiC Ceramic Matrix Composites (CMCs) after a material removal process*. Materials Science and Engineering: A. Materials Science and Engineering, 19. leden 2019, 743, stránky 1-11.
15. Jim LOW, Yu DONG. *Composite Materials: Manufacturing, Properties and Applications*. místo neznámé : Elsevier, 2021. ISBN 978-0128205129.
16. Arun Kumar SHARMA, Rakesh BHANDARI, Amit AHERWAR, Rūta RIMAŠAUSKIENĚ. *Matrix materials used in composites: A comprehensive study*. *materialstoday: Proceeding*. materialstoday, 29. prosinec 2019, Sv. 21, 3, stránky 1559-1562.
17. Lokesh SINGH, Bharat SINGH, Kuldeep K. SAXENA. *Manufacturing techniques for metal matrix composites (MMC): an overview*. Advances in Materials and Processing Technologies. Special Issue on Materials Processing and Characterisation (ICMPC), 11. leden 2020, Sv. 2, 6, stránky 441-457.

18. Yao QIAO, Lisa D. FRING, Madhusudhan R. PALLAKA, Kevin L. SIMMONS. *A review of the fabrication methods and mechanical behavior of continuous thermoplastic polymer fiber–thermoplastic polymer matrix composites*. Polymer Composites. Polymer Composites, 22. listopad 2022, Sv. 2, 44, stránky 694-733.
19. Costas BOGIATZIDIS, Loukas ZOUMPOULAKIS. *Thermoset Polymer Matrix Composites of Epoxy, Unsaturated Polyester, and Novolac Resin Embedding Construction and Demolition Wastes powder: A Comparative Study*. Polymers. Polymers, 27. únor 2021, Sv. 13, 5.
20. K. M. Faridul HASAN, Péter György HORVÁTH, Tibor ALPÁR. *Potential fabric-reinforced composites: a comprehensive review*. [editor] J Mater Sci. Journal of Materials Science. Journal of Materials Science, 26. květen 2021, Sv. 56, stránky 14381–14415.
21. SKOLIL KOMPOZIT. Tkaniny pro epoxidové kompozity. Skolil Kompozit.
22. Dennis BUDELMANN, Carsten SCHMIDT, Dieter MEINERS. *Prepreg tack: A review of mechanisms, measurement, and manufacturing implication*. Polymer Composites. Polymer Composites, 23. květen 2020, Sv. 41, 9, stránky 3440-3458.
23. Mina Derakhshani DASTJERDI, Massimo CARBONI, Massimo CARBONI. *Mechanical Properties of Uncured Thermoset Tow Prepreg: Experiment and Finite Element Analysis*. Journal of Composite Science. J. Compos. Sci., 29. červenec 2023, Sv. 7, 8.
24. Vilson Dalla LIBERA Junior, Linconl Araujo TEIXEIRA, Sandro Campos AMI, Sandra Maria da LUZ. *Processing, thermal and mechanical properties of composite laminates with natural fibers prepregs*. Polymers and Polymers Composites. Polymers and Polymers Composites, 25. květen 2022, 30.
25. Yiyo KUO, Ssu-Han CHEN. *Parameters Adjustment Optimization for Prepreg of Copper Clad Laminate Based on Virtual Metrology*. Applied Sciences. místo neznámé : Applied Sciences, 27. listopad 2020. Sv. 10, 23.
26. Jawaid MOHAMMAD, Thariq MOHAMED, Saba NAHEED. *Aging Mechanisms in Polymer Composite Materials*. místo neznámé : Elsevier, 2019. ISBN 978-0-08-102298-6.
27. Zhang HONGJI, Ge YUANYUAN, Tang HONG, Shi YAOYAO, Miao YINGGANG, Hu YUAN. *Examination of low-velocity impact and mechanical properties after impact of fiber-reinforced prepreg composites*. Polymer composites. Polymer composites, 15. listopad 2018, Sv. 40, 6, stránky 2154-2164.
28. Rima Sfar ZBED, Vincent SOBOTKA, Steven Le CORRE. *A Three-Dimensional Thermo-Chemical Characterization During the Whole Curing Cycle of a Carbon / Epoxy Prepreg*. HAL. [Online] 1, 21. duben 2021. [Citace: 3. únor 2024.] <https://hal.science/hal-03203967/>. hal-03203967.
29. C. NETZEL, D. HOFFMANN, M. BATTLE, P. HUBERT, S. BICKERTON. *Effects of environmental conditions on uncured prepreg characteristics and their effects on defect generation during autoclave processing*. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing. Composites, 3. září 2021, Sv. 151, 106636.
30. Vincent K. MAES, Kevin POTTER, James KRATZ. *Features and defects characterisation for virtual verification and certification of composites: A review*. Composites Part B: Engineering. Composites, 9. září 2022, Sv. 246, 110282.
31. LOSERTO VÁ, Monika. *PROGRESIVNÍ MATERIÁLY*. Ostrava : Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, 2012. 978-80-248-2575-5.
32. Anna KUFEL, Stanislaw KUCIEL. *Hybrid Composites Based on Polypropylene with Basalt/Hazelnut Shell Fillers: The Influence of Temperature, Thermal Aging, and Water Absorption on Mechanical Properties*. Polymers. polymers, 20. prosinec 2019, Sv. 12, 1.
33. Md. SAFIUDDIN, George ABDEL-SAYED, George ABDEL-SAYED. *Absorption and Strength Properties of Short Carbon Fiber Reinforced Mortar Composite*. Buildings. Buildings, 8. červenec 2021, Sv. 11, 7.

34. Senthil Muthu Kumar THIAGAMANI, Senthilkumar KRISHNASAMY, Chandrasekar MUTHUKUMAR, Jiratti TENG SUTHIWAT, Rajini NAGARAJAN, Suchart SIENGCHIN, Sikiru O. ISMAIL. *Investigation into mechanical, absorption and swelling behaviour of hemp/sisal fibre reinforced bioepoxy hybrid composites: Effects of stacking sequences*. International Journal of Biological Macromolecules. International Journal of Biological Macromolecules, 1. listopad 2019, 140, stránky 637-646.
35. Norlin NOSBI, Haslan Fadli Ahmad MARZUKI, Muhammad Razlan ZAKARIA, Wan Fahmin Faiz Wan ALI, Fatima JAVED, Muhammad IBRAR. *Structure Property Investigation of Glass-Carbon Prepreg Waste-Polymer Hybrid Composites Degradation in Water Condition*. Processes. Processes, 10. listopad 2020, Sv. 8, 11.
36. BREBU, Mihai. *Environmental Degradation of Plastic Composites with Natural Fillers—A Review*. Polymers. Polymers, 20. leden 2020, Sv. 12, 1.
37. Adnan AMJAD, Aslina Anjang Ab RAHMAN, Habib AWAIS, Mohd Shukur Zainol ABIDIN, Junaid KHAN. *A review investigating the influence of nanofiller addition on the mechanical, thermal and water absorption properties of cellulosic fibre reinforced polymer composite*. Journal of Industrial Textiles. Journal of Industrial Textiles, 6. Prosinec 2021.
38. Muhsan BELHAJ, Ali DODANGEH, Mehdi HOJJATI. *Experimental investigation of prepreg tackiness in automated fiber placement*. Composite Structures. Composite Structures, 15. duben 2021, Sv. 262, 113602.
39. Aneela SABIR, Faiza ALTAF, Rida BATOOL, Muhammad SHAFIQ, Rafi Ullah KHAN, Karl I. JACOB. *Green composites and their manufacturing*. Green Sustainable Process for Chemical and Environmental Engineering and Science. Green Composites: Preparation, Properties, and Allied Applications, 1. červenec 2022, stránky 71-108.
40. Bogdan RUSU, Simona BBLINDU, Andra MICU, Valentin SOARE. *Guidelines for Aircraft Composite Panels*. Google Scholar. [Online] květen 2020. [Citace: 14. leden 2024.] https://bulletin.incas.ro/files/rusu-b__blindu-s__micu-a__soare-v__vol_12_iss_1.pdf.
41. Tatiana KOJNOKOVÁ, František NOVÝ, Lenka MARKOVIČOVÁ. *The Study of Chemical and Thermal Influences of the Environment on the Degradation of Mechanical Properties of Carbon Composite with Epoxy Resin*. polymers. 9. Srpen 2022, Sv. 14, 16.
42. Yusuf KEPİR, Alper GUNOZ, Memduh KARA. *Effects of Environmental Conditions on the Mechanical Properties of Composite Materials*. Advanced Engineering Journal. 22. květen 2021, Sv. 1, 1, str. 5.
43. Felice RUBINO, Antonio NISTICÒ, Fausto TUCCI, Pierpaolo CARLONE. *Marine Application of Fiber Reinforced Composites: A Review*. Marine Science and Engineering. 6. leden 2020, Sv. 8, 1.
44. Ruey Shan CHEN, Yusri Helmi MUHAMMAD, Sahrim AHMAD. *Physical, mechanical and environmental stress cracking characteristics of epoxy/glass fiber composites: Effect of matrix/fiber modification and fiber loading*. Polymer Testing. 4. únor 2021, Sv. 96, 107088.
45. Hadeel I. KADHIM, Awham M. HAMEED, Bisma M. FAHAD. *The Influence of Aggressive Media on the Weight and Surface Hardness of Epoxy-Glass Waste Composite*. Iraqi Journal of Industrial Research. 19. květen 2022, Sv. 9, 2, stránky 1-9.
46. W. JARRETT, S.P. JEFFS, F. KORKEES, M. RAWSON. *The opportunities and challenges of hybrid composite driveshafts and their couplings in the aerospace industry: A review*. Composite Structures. 15. září 2023, Sv. 320, 117203.
47. Mohd Hafizal HAMIDON, M.T.H. SULTAN, Ahmad Hamdan ARIFFIN. *7 - Investigation of mechanical testing on hybrid composite materials. Failure Analysis in Biocomposites, Fibre-Reinforced Composites and Hybrid Composites*. Woodhead Publishing Series in Composites Science and Engineering, 2019, stránky 133-156.

48. N. SABA, M. JAWAID, M.T.H. SULTAN. 1 - *An overview of mechanical and physical testing of composite materials. Mechanical and Physical Testing of Biocomposites, Fibre-Reinforced Composites and Hybrid Composites.* Woodhead Publishing Series in Composites Science and Engineering, 2019, stránky 1-12.
49. MARTINÁK, M. *Tahová zkouška.* Kontrola a měření pro 3. ročník SPŠ strojnických. Praha : SNLT, 1989.
50. HORÁKOVÁ, M. *Zkouška tahem – typy diagramů.* Zkoušení mechanických vlastností.
51. Wei FAN, Wensheng DANG, Tao LIU, Juanzi LI, Lili XUE, Linjia YUAN, Jingjing DONG. *Fatigue behavior of the 3D orthogonal carbon/glass fibers hybrid composite under three-point bending load.* Materials & Design. Materials & Design, 5. Prosinec 2019, Sv. 183, 108112.
52. Guijun XIAN, Rui GUO, Chenggao LI. *Combined effects of sustained bending loading, water immersion and fiber hybrid mode on the mechanical properties of carbon/glass fiber reinforced polymer composite.* Composite Structures. Composite Structures, 1. leden 2022, Sv. 281, 115060.
53. ZWICKROELL. *Zkouška ohybem.* Zkouška ohybem.
54. ASTM. *Standard Test Methods for Constituent Content of Composite Materials.* ASTM. [Online] 9. Březen 2022. [Citace: 10. únor 2024.] https://www-astm-org.translate.goog/d3171-22.html?_x_tr_sl=en&_x_tr_tl=cs&_x_tr_hl=cs&_x_tr_pto=sc.
55. ISO 178. *ČSN EN ISO 178 Plasty - Stanovení ohybových vlastností.* European Standards. [Online] 1. listopad 2019. [Citace: 10. únor 2024.] <https://www.technickenormy.cz/csn-en-iso-178-plasty-stanoveni-ohybovych-vlastnosti/>.
56. ISO 10618. *ISO 10618:2004.* ISO. [Online] Srpen 2004. [Citace: 10. únor 2024.] <https://www.iso.org/standard/33313.html>.
57. ISO 14125. *ČSN EN ISO 14125 Vlákný vyztužené plastové kompozity - Stanovení ohybových vlastností.* European Standards. [Online] 1. červen 1999. [Citace: 10. únor 2024.] <https://www.technickenormy.cz/csn-en-iso-14125-vlakny-vyztuzene-plastove-kompozity-stanoveni-ohybovych-vlastnosti/>.
58. ChemTrend. *Chemlease 2191W - Product data sheet,* 2016
59. ChemTrend. *Zyvax SealerGP - Product data sheet,* 2018
60. Impregnatex compositi S.r.l., *IMP 503Z Matrix product data,* 2015
61. Ecolab. *Incidin Rapid - Product data sheet,* 2008
62. Bacoban International. *Bacoban WB(nealko) koncentrát - product data sheet,* 2012
63. Panini S.r.l., *Uživatelský návod: Autokláv Formula 1, Autokláv pro polymerizaci kompozitních materiálů,* 2014
64. ČSN EN ISO 14125, *Vlákný vyztužené plastové kompozity – Stanovení ohybových vlastností,* Český normalizační institut, 1999
65. ČSN EN ISO 527-4, *Plasty – Stanovení tahových vlastností – Část 4: Zkušební podmínky pro izotropní a ortotropní plastové kompozity vyztužené vlákny,* Český normalizační institut, 1998

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

°C	stupeň Celsia
Δl	délka vzorku po zkoušce
ΔF	rozdíl mezi dvěma silami při dvou různých průhybech
Δy	rozdíl mezi dvěma průhyby při dvou různých silách
Al_2O_3	Oxid hlinitý
AlN	Hliníkový nitrid
ASTM	Standart Test Metod
b	šířka
ČSN	Česká státní norma
d_0	Průměr/šířka vzorku
DIN	Deutsches Institut für Normung
E_o	modul pružnosti v ohybu
E_t	modul pružnosti v tahu
EN	Evropská normy
ε	smluvní deformace v tahu/ ohybu
F	Síla
F_{max}	maximální síla
F_t	síla v tahu
h	výška
h_0	Výška vzorku
ISO	International Organization for Standardization
J	Joule
l	litr, ve vzorci délka po zatížení
l_o	délka tělesa před zatížením
L	délka

ml	mililitry
mm	Milimetry
MPa	Megapascal
n	počet prvků
N	Newton
Ns ⁻¹	Newton za sekundu
PEEK	Poly-ether-ether-keton
PEKK	Poly-ether-keton-keton
pH	kyselost, zásaditost
σ_{\max}	maximální napětí
σ_o	napětí v ohybu
σ_t	napětí v tahu
SiC	Karbid křemíku
SiO ₂	Oxid křemičitý
$s_{\bar{x}}$	odhad směrodatné odchylky aritmetického průměru
TiO ₂	Oxid titanu
u_a	odhad nejistoty měření typu a
$v_{\bar{x}}$	variační koeficient
W	vykonaná práce
\bar{x}	odhad aritmetického průměru výběrového souboru

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1 Kompozit s dlouhými vlákny [5]	14
Obrázek 2 Kompozit s krátkými vlákny [5]	15
Obrázek 3 Kompozit s částicovým plnivem [5]	16
Obrázek 4 Vlákna v polymerní matrici [12]	17
Obrázek 5 Typy tkanin [21]	22
Obrázek 6 Schéma výroby prepregu [25]	25
Obrázek 7 Schéma vrstvení a delaminace vrstev [31]	29
Obrázek 8 Příklad grafu, jak se liší namáhání s a bez absorpce [35]	33
Obrázek 9 Únava MMC kompozitu s vlákny a) vysokocyklová b) nízkocyklová [31]	35
Obrázek 10 Schéma tahového stroje [49]	42
Obrázek 11 Příklady tahového diagramu [50]	42
Obrázek 12 Schéma tlakové zkoušky [50]	44
Obrázek 13 Zkouška tří-bodovým a čtyř-bodovým ohybem [53]	45
Obrázek 14 Odformovací prostředek 1	51
Obrázek 15 Oformovací prostředek 2	52
Obrázek 16 Desky pro vzorky	52
Obrázek 17 Na pravo ve předu Incidin Rapid, za ním motorový olej, za olejem bacoban, na levo kyselina sírová a za ní roztok soli	55
Obrázek 18 Ohybová zkouška	57
Obrázek 19 Tahová zkouška	58
Obrázek 20 Průběh ohybového napětí v závislosti na deformaci pro tělíska 1	59
Obrázek 21 Průběh ohybového napětí v závislosti na deformaci pro tělíska 2	60
Obrázek 22 Průběh ohybového napětí v závislosti na deformaci pro tělíska 3	61
Obrázek 23 Průběh ohybového napětí v závislosti na deformaci pro tělíska 4	63
Obrázek 24 Průběh ohybového napětí v závislosti na deformaci pro tělíska 5	64
Obrázek 25 Průběh ohybového napětí v závislosti na deformaci pro tělíska 6	65
Obrázek 26 Průběh ohybového napětí v závislosti na deformaci pro tělíska 7	66
Obrázek 27 Průběh ohybového napětí v závislosti na deformaci pro tělíska 8	67
Obrázek 28 Průběh ohybového napětí v závislosti na deformaci pro tělíska 9	68
Obrázek 29 Průběh ohybového napětí v závislosti na deformaci pro tělíska 10	69
Obrázek 30 Průběh ohybového napětí v závislosti na deformaci pro tělíska 11	70
Obrázek 31 Průběh ohybového napětí v závislosti na deformaci pro tělíska 12	71
Obrázek 32 Průběh ohybového napětí v závislosti na deformaci pro tělíska 13	73
Obrázek 33 Průběh ohybového napětí v závislosti na deformaci pro tělíska 14	74

Obrázek 34 Průběh ohybového napětí v závislosti na deformaci pro tělíska 15	75
Obrázek 35 Průběh ohybového napětí v závislosti na deformaci pro tělíska 16	76
Obrázek 36 Průběh ohybového napětí v závislosti na deformaci pro tělíska 17	77
Obrázek 37 Průběh ohybového napětí v závislosti na deformaci pro tělíska 18	78
Obrázek 38 Průběh tahového napětí v závislosti na deformaci pro tělíska 1	80
Obrázek 39 Průběh tahového napětí v závislosti na deformaci pro tělíska 2	81
Obrázek 40 Průběh tahového napětí v závislosti na deformaci pro tělíska 3	82
Obrázek 41 Průběh tahového napětí v závislosti na deformaci pro tělíska 4	83
Obrázek 42 Průběh tahového napětí v závislosti na deformaci pro tělíska 5	84
Obrázek 43 Průběh tahového napětí v závislosti na deformaci pro tělíska 6	85
Obrázek 44 Průběh tahového napětí v závislosti na deformaci pro tělíska 7	87
Obrázek 45 Průběh tahového napětí v závislosti na deformaci pro tělíska 8	88
Obrázek 46 Průběh tahového napětí v závislosti na deformaci pro tělíska 9	89
Obrázek 47 Průběh tahového napětí v závislosti na deformaci pro tělíska 10	91
Obrázek 48 Průběh tahového napětí v závislosti na deformaci pro tělíska 11	92
Obrázek 49 Průběh tahového napětí v závislosti na deformaci pro tělíska 12	93
Obrázek 50 Průběh tahového napětí v závislosti na deformaci pro tělíska 13	94
Obrázek 51 Průběh ohybového napětí v závislosti na deformaci pro tělíska 14	95
Obrázek 52 Průběh tahového napětí v závislosti na deformaci pro tělíska 15	96
Obrázek 53 Průběh tahového napětí v závislosti na deformaci pro tělíska 16	98
Obrázek 54 Průběh tahového napětí v závislosti na deformaci pro tělíska 17	99
Obrázek 55 Průběh tahového napětí v závislosti na deformaci pro tělíska 18	100

SEZNAM TABULEK

<i>Tab. 1 Naměřené a zpracované výsledky z ohybové zkoušky 1</i>	59
<i>Tab. 2 Naměřené a zpracované výsledky z ohybové zkoušky 2</i>	60
<i>Tab. 3 Naměřené a zpracované výsledky z ohybové zkoušky 3</i>	61
<i>Tab. 4 Naměřené a zpracované výsledky z ohybové zkoušky 4</i>	62
<i>Tab. 5 Naměřené a zpracované výsledky z ohybové zkoušky 5</i>	63
<i>Tab. 6 Naměřené a zpracované výsledky z ohybové zkoušky 6</i>	64
<i>Tab. 7 Naměřené a zpracované výsledky z ohybové zkoušky 7</i>	66
<i>Tab. 8 Naměřené a zpracované výsledky z ohybové zkoušky 8</i>	67
<i>Tab. 9 Naměřené a zpracované výsledky z ohybové zkoušky 9</i>	68
<i>Tab. 10 Naměřené a zpracované výsledky z ohybové zkoušky 10</i>	69
<i>Tab. 11 Naměřené a zpracované výsledky z ohybové zkoušky 11</i>	70
<i>Tab. 12 Naměřené a zpracované výsledky z ohybové zkoušky 12</i>	71
<i>Tab. 13 Naměřené a zpracované výsledky z ohybové zkoušky 13</i>	72
<i>Tab. 14 Naměřené a zpracované výsledky z ohybové zkoušky 14</i>	73
<i>Tab. 15 Naměřené a zpracované výsledky z ohybové zkoušky 15</i>	74
<i>Tab. 16 Naměřené a zpracované výsledky z ohybové zkoušky 16</i>	76
<i>Tab. 17 Naměřené a zpracované výsledky z ohybové zkoušky 17</i>	77
<i>Tab. 18 Naměřené a zpracované výsledky z ohybové zkoušky 18</i>	78
<i>Tab. 19 Naměřené a zpracované výsledky z tahové zkoušky 1</i>	79
<i>Tab. 20 Naměřené a zpracované výsledky z tahové zkoušky 2</i>	80
<i>Tab. 21 Naměřené a zpracované výsledky z tahové zkoušky 3</i>	82
<i>Tab. 22 Naměřené a zpracované výsledky z tahové zkoušky 4</i>	83
<i>Tab. 23 Naměřené a zpracované výsledky z tahové zkoušky 5</i>	84
<i>Tab. 24 Naměřené a zpracované výsledky z tahové zkoušky 6</i>	85
<i>Tab. 25 Naměřené a zpracované výsledky z tahové zkoušky 7</i>	86
<i>Tab. 26 Naměřené a zpracované výsledky z tahové zkoušky 8</i>	87
<i>Tab. 27 Naměřené a zpracované výsledky z tahové zkoušky 9</i>	89
<i>Tab. 28 Naměřené a zpracované výsledky z tahové zkoušky 10</i>	90
<i>Tab. 29 Naměřené a zpracované výsledky z tahové zkoušky 11</i>	91
<i>Tab. 30 Naměřené a zpracované výsledky z tahové zkoušky 12</i>	92
<i>Tab. 31 Naměřené a zpracované výsledky z tahové zkoušky 13</i>	94
<i>Tab. 32 Naměřené a zpracované výsledky z tahové zkoušky 14</i>	95
<i>Tab. 33 Naměřené a zpracované výsledky z tahové zkoušky 15</i>	96
<i>Tab. 34 Naměřené a zpracované výsledky z tahové zkoušky 16</i>	97

<i>Tab. 35 Naměřené a zpracované výsledky z tahové zkoušky 17</i>	<i>98</i>
<i>Tab. 36 Naměřené a zpracované výsledky z tahové zkoušky 18</i>	<i>100</i>

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha P I: MATRIX PRODUCT DATA IMP503Z

Příloha P II: Data sheet Chemlease A2181W

Příloha P III: Data sheet Zyvax Sealer GP

PŘÍLOHA P I : : MATRIX PRODUCT DATA IMP503Z



Via Tiepolo, 19 20022 CASTANO PRIMO (MI) Tel. +39 0331 880564 www.impregnatex.it

MATRIX PRODUCT DATA

IMP503Z

ST-130213-rev7-09/01/2015

DESCRIPTION

Modified epoxy resin IMP503Z is suitable for prepregging of carbon/glass and aramid fabrics. IMP503Z with his high transparency is suitable for "carbon look" composite part where high cosmetrical requirements are needed. IMP503Z can be used with carbon or metallic mould with the standard technologies: Hot Press, Wrapping, Autoclave and Vacuum Bag.

BENEFITS AND FEATURES

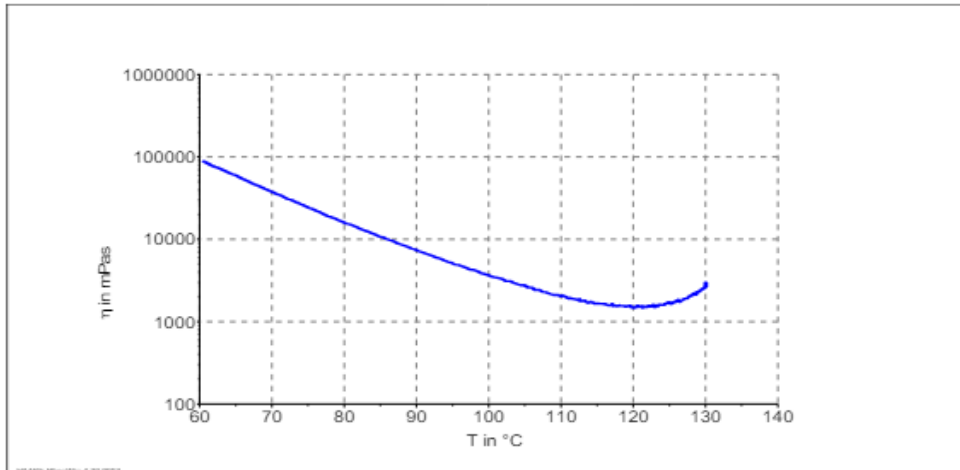
- Field of applications: automotive, sporting goods, marine, industrial
- Different curing cycles are possible
- Good mechanical properties
- UV resistance improved

RESIN PROPERTIES

TYPE		TOUGHENED
Cured resin density	gr/cm ³	1,15 ÷ 1,25
Gel Time at 125 °C (257 °F)	minuti	6'-9'
Gel Time at 110 °C (221 °F)	minuti	20 ÷ 26
TACK		MEDIUM/HIGH
Resin VOC on prepreg	%	< 1
Tg fully cured (Tan Delta DMA)	°C (°F)	120 (248)
Shelf life at room temperature (23 °C)	weeks	5
Shelf Life (-18°C approx)	years	1

VISCOSITY VS TEMPERATURE BEHAVIOUR

The plot under depicted below is performed with cone-plate rehometer starting from 60°C until viscosity kick off.
Parameters: frequency 0.2 Hz and heating rate 3 °C/min.



CURING CYCLES SUGGESTED

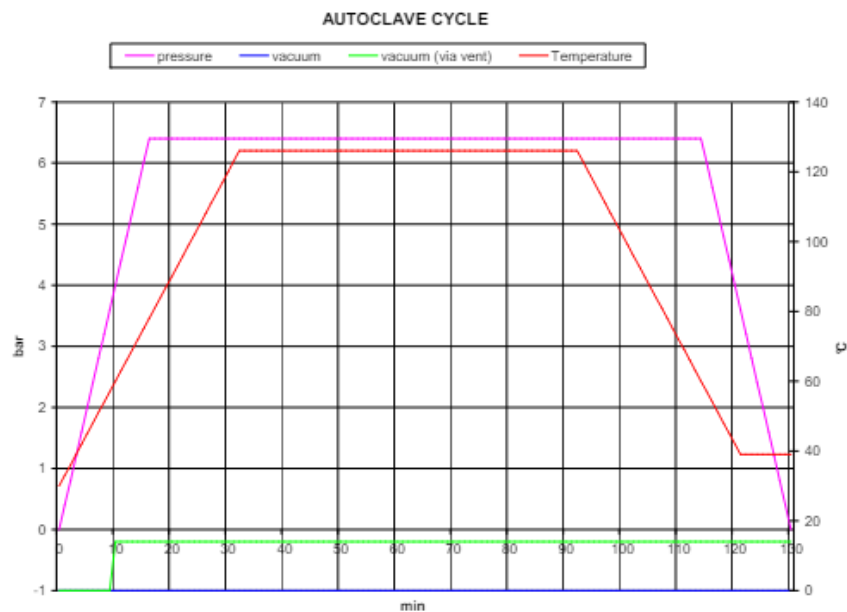
TEMPERATURES	TIME	Tg (TanDelta DMA, °C)
110	2h	120-125
125	1h	120-125

PROCESS DESCRIPTIONS

Autoclave:

125°C cycle

1. After making the bag put it in the autoclave and apply -0.9 ÷ -1.0 bar vacuum
2. Heat to 125°C at 1-3 min/°C rate
3. Apply the pressure, with quick increment slope, in order to reach the maximum possible value (ex. 4÷7 bar) before 80°C. Reached the process pressure is possible reduce the vacuum value to -0.2 bar (via vent). This option depend on the evaluations of the autoclave driver.
4. When 125°C temperature is reached dwell it and the pressure for 1h
5. Cool to 60°C under pressure, then release the pressure
6. At room temperature get the part out of the autoclave



Hot Press:

125°C cycle:

1. Put the prepreg material into the mould at room temperature and close the mould at 1Bar pressure
2. Heat to 125°C at 1-3°C/min (3-5°C/min for small part if possible)
3. When 100-110°C is reached apply 2-3 Bar or over if the flow can be controlled
4. When 125°C temperature is reached dwell it and the pressure for 1h
5. Cool to 40-50°C under pressure and pull the part out

IMP503 Z is a reactive epoxy formulation, too high heat up rate and/or too high temperature dwell can give out of control temperature inside the stack lay up when thick laminate are processed (thickness over 1 cm)

These autoclave and hot press cycle are only suggestions based on Impregnatex Compositi experiences and are not absolute way to process properly the material. Different equipments may need different curing cycle conditions.

TYPICAL MECHANICAL PROPERTIES

The mechanical data below were performed on laminate cured by hot press technology at 125°C curing cycle (see above).

FABRIC	Flexural Strength ASTM D790 [Mpa]	Flexural Modulus ASTMD790 [GPa]	G1c mod. ASTM D5528 [J/m ²]	ILSS ASTM 2344 [N/mm ²]	Volume of fibre [%]
GG630T	730	57	800	56	64
GG428T	800	52	-	64	59
GG204T-V (1)	800	54	-	64	59
GG205T	810	55	750	68	58
GG245T	800	54	760	65	56
GG380T	800	55	730	64	62
GG90P	655	52	-	70	65
GG204P	810	53	-	66	59
CX400	938	56	-	54	62 (provini ricavati in direzione +45°)
GG800T	822	60	-	52	64
GG285T4	805	51	-	61	65
VV290T	630	27	-	57	64.8
VV380	710	23	-	64	60

FABRIC	Flexural Strength ASTM D790 [Mpa]	Flexural Modulus ASTM D790 [GPa]	G1c mod. ASTM D5528 [J/m ²]	ILSS ASTM 2344 [N/mm ²]	Volume of fibre [%]
VV580T	760	30	1160	60	56
VV700	750	25	-	56	64
KK300	440	21	-	44	56
GV330UD	1150	115	700	73	66
GV335UD	650	250	-	62	54

The values are to be understood as the average of the experimental values observed.

- (1) is also available as stabilized WF1, for exposed areas where high aesthetic of textile construction must be maintained during the process.

These mechanical data were obtained by hot press technology. With different curing cycle technology these data can be different.

PREPREG STORAGE LIFE

This prepreg should be stored as received in a cool dry place or in a refrigerator. Storage life at different temperatures:

- 12 Months at -18 °C
- 5 weeks at +23 °C

After removal from refrigerator storage, prepreg should be allowed to reach room temperature before opening the polythene bag to prevent water condensation.

PRECAUTIONS FOR USE

To handle properly the prepreg product observe the established precautions.

Operators working with this prepreg should wear clean and impervious gloves to reduce the possibility of skin contact and to prevent the prepreg contamination
Safety data sheet is available for this product.

NOTE

The above mentioned technical informations are based on our actual knowhow and accurate, reproducible laboratories tests but due to the product complexity and its further processing, is not possible guarantee these.
Impregnatex Compositi will reserve to made further modification to this paperwork

PŘÍLOHA II: DATA SHEET CHEMLEASE A2181W



Chemlease® 2191W

Water-based semi permanent composite release agent

Description

Chemlease® 2191W is a semi permanent water-based release agent, which is effective for composite molding including processes using vacuum bagged epoxy carbon fiber prepreg components. It gives minimal transfer of release agent and multiple releases. Chemlease® 2191W is ready-to-use as shipped.

Application

Chemlease® 2191W can be applied on cold molds in a wipe-on mode or may be spray applied on to cold or hot molds. It is not recommended for application on cold steel molds as corrosion may occur. Certain mold surface textures, notably high gloss finishes, can cause the applied film to form into beads rather than a smooth, even film. This is normal and the special application instructions below should be followed in these cases

Mold Preparation

Thoroughly clean the mold with the appropriate Chemlease® mold cleaner to remove the previous release agent or other contamination. Wipe dry with a clean cloth.

Wipe on/ leave on application

Soak a clean, lint-free soft cotton cloth with Chemlease® 2191W. Apply three to five light* uniform coats to the clean mold surface. The film should proceed to dry evenly at ambient temperature. If the film appears to form beads, the wet wiping cloth should be used to spread the beads over the mold surface until the film appears smooth. In the case of high gloss finish molds, gently buff the smoothed film to a shine using a clean dry cotton cloth. Let the coats toughen for at least 10 minutes after each application. After the final coat, allow to cure for minimum one hour before starting production.

Spray on/ leave on application

Using a finely-atomized spray, apply three to five light* uniform coats of Chemlease® 2191W to the clean mold surface. The film should proceed to dry evenly at ambient temperature. If the film appears to form beads, a wiping cloth wetted with Chemlease® 2191W should be used to spread the beads over the mold surface until the film appears smooth. In the case of high gloss finish molds, gently buff the smoothed film to a shine using a clean dry cotton cloth. Let the coats dry 10 minutes after each application. After the final coat, allow to cure for minimum one hour before starting production.

Reapplication

Reapply a light coat of Chemlease® 2191W when required to maintain desired release. Allow to cure for one hour before starting production. To prevent buildup, avoid over application.

*As a guide to achieving a "light coat", when the film is applied to a VERTICAL mold surface, the wet film should shine, but there should be no runs in it. Runs in the film indicate too heavy an application.

Important

The recommended number of coats and cure times are a general guideline found to be more than sufficient in a broad spectrum of molding conditions. When molding products with extreme geometries or experiencing low humidity conditions in the shop, the customer may find the need to extend the cure time between coats and increase the number of coats applied to the mold. The efficiency of a release film is best determined through a combination of tape tests and experimentation in order to ensure optimum performance.

Storage

Do not store at temperatures above 38°C. Prolonged exposure to higher temperatures may reduce product stability and/or performance. Do not allow to freeze. Keep container tightly sealed to prevent evaporation and/or contamination. If stored in cold temperatures, allow product to warm to room temperature and shake well prior to use. Do not use, if the use-by date has been exceeded (see label on container).

Handling

We recommend all fluid handling equipment and piping be made of stainless steel or plastic. Brass, copper or aluminium is not suitable. For further information on storage, handling, hazards etc., please consult the Material Safety Data Sheet.

Packaging

Product is available in a variety of packaging. Please contact our customer service team for details.



Release Innovation™



Chemlease® 2191W

Water-based semi permanent composite release agent

Safety Data

For more information on storage, handling, hazards, etc., please request a copy of Chem-Trend's Material Safety Data Sheet, which must be consulted prior to use of this product.

Further Information

Request information on our complete range of materials for this industry.

Legal Notice

The information contained in this document is given in good faith based on our current knowledge. It is only an indication and in no way binding, particularly as regards infringement of or prejudice to third party rights through the use of our products. Chem-Trend warrants only that its products will meet its sales specifications. This information must on no account be used as a substitute for necessary prior tests which alone can ensure that a product is suitable for a given use. Users are requested to check that they are in possession of the latest version of this document and Chem-Trend is at their disposal to supply any additional information.

PŘÍLOHA III: DATA SHEET ZYVAX SEALER GP



Zyvax® Sealer GP Solvent-Based Mold Sealer



©2016 Chem-Trend L.P.

Description

Zyvax® Sealer GP is a high modulus, clear, flexible film with superior substrate adhesion that forms a protective shield on the mold surface. As a conditioner, Zyvax® Sealer GP is designed to treat both the chemical and physical bonding sites found on every "raw" mold surface. In addition, Zyvax® Sealer GP provides the base needed to extend the life of the release coating and will allow optimal performance from the release coating. For the mold release system best suited to your needs, see our website: www.chemtrend.com.

Benefits

- Retains mold detail and finish
- Thermal stability: 480°C (900°F)
- Restores vacuum integrity
- Can be used with all release agents

Uses

Zyvax® Sealer GP overcomes micro-porosity in mold surfaces, eliminates the break-in time for new molds, restores a uniform surface when used over a mold repair or patch, protects the surface of the mold from styrene emission and oxidation, therefore extending the useful life of the mold.

Application Instructions

Before applying Zyvax® Sealer GP: All previous surface treatments, residues, waxes or oils should be removed using a Zyvax® mold cleaner and part cleaner:

1. Apply Zyvax® Sealer GP to a small area of the mold (1-2 ft²; 0.2 m²) using a paper towel or clean, lint-free cloth.
2. While still wet, wipe dry using a separate clean paper towel or lint free cloth. Make sure entire mold surface is coated in this manner, slightly overlapping the last coated area if you are applying in sections. Be certain that all contours are adequately coated.
3. Allow a minimum of 15 minutes cure time before application of next coat.

4. Apply a second coat of Zyvax® Sealer GP in the same way, and wait for a minimum of 15 minutes before applying the next coat. Four coats are recommended for most substrates. Additional coats can be used for porous or repaired molds. After the final coat of Zyvax® Sealer GP, wait at least 30 minutes before applying release agent.

Storage

For best results, store between 5°C and 30°C (41°F and 86°F) Keep from freezing. Keep container tightly sealed to prevent evaporation and/or contamination. If stored in cold temperatures, allow product to warm to room temperature prior to use. Shelf life is 18 months from the date of manufacture, in the original unopened container. NOTE: *Product is moisture-sensitive. Container must be kept tightly closed when not in use.*

Handling

We believe Zyvax® Sealer GP has a low degree of hazard when used as intended. For more information, request a copy of Chem-Trend's Safety Data Sheet.

Packaging

Zyvax® Sealer GP is available in a variety of package sizes. Please contact Chem-Trend customer service for details.

Further Information

Request information on our complete range of materials for this industry.

Legal Notice

The technical information and suggestions for use contained herein is based on our general experience and knowledge at the time of publication and is intended to give information of possible applications to a professional with technical experience. It does not release the customer from the obligation of performing own tests with the product selected for a specific application. While the information and suggestions are believed to be accurate and reliable, nothing stated in this bulletin is to be taken as a warranty either expressed or implied.



Chem-Trend (Deutschland) GmbH | Ganghoferstr. 47 | 82216 Maisach-Gernlinden, Germany
Tel +49 8142 417 0 | Fax: +49 8142 15884 | ChemTrend.com
Issue: 01/2018 replaces 05/2014, Page 1 of 1, Zyvax® Sealer GP

Copyright © Chem-Trend L.P., All Rights Reserved