

# Vliv teploty a vlhkosti na mechanické vlastnosti kompozitů

Bc. Tomáš Hanák

---

Diplomová práce  
2019



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně  
Fakulta technologická

---

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně  
Fakulta technologická  
Ústav výrobního inženýrství  
akademický rok: 2018/2019

## **ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE**

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Tomáš Hanák**  
Osobní číslo: **T17281**  
Studijní program: **N3909 Procesní inženýrství**  
Studijní obor: **Výrobní inženýrství**  
Forma studia: **prezenční**

Téma práce: **Vliv teploty a vlhkosti na mechanické vlastnosti kompozitů**

Zásady pro vypracování:

- 1. Vypracování literární rešerše v dané oblasti**
- 2. Výroba zkušebních vzorků**
- 3. Expozice zk.těles a provedení mech. zkoušek**
- 4. Vyhodnocení výsledků z hlediska praktických aplikací**

Rozsah diplomové práce: **cca 60 stran**  
Rozsah příloh: **dle pokynů VDP**  
Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

1. **EHRENSTEIN, Gottfried W. Polymerní kompozitní materiály. V ČR 1. vyd. Praha: Scientia, 2009, 351 s. ISBN 978-80-86960-29-6.**
2. **KOŘÍNEK, Zdeněk. Kompozity [online]. [cit. 2019-01-26]. Dostupné z: <https://kompozity.webnode.cz/>**

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Milan Žaludek, Ph.D.**  
Ústav výrobního inženýrství  
Datum zadání diplomové práce: **2. ledna 2019**  
Termín odevzdání diplomové práce: **17. května 2019**

Ve Zlíně dne 7. února 2019

L.S.

doc. Ing. Roman Čermák, Ph.D.  
*děkan*

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

## PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že

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

Ve Zlíně 13.05.2019

.....

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

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

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

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

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

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

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

(1) Škola nebo školské či vzdělávací zařízení mají za obvyklých podmínek právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla (§ 35 odst. 3). Odpírá-li autor takového díla udělit svolení bez vážného důvodu, mohou se tyto osoby domáhat nahrazení chybějícího projevu jeho vůle u soudu. Ustanovení § 35 odst. 3 zůstává nedotčeno.

(2) Není-li sjednáno jinak, může autor školního díla své dílo užít či poskytnout jinému licenci, není-li to v rozporu s oprávněnými zájmy školy nebo školského či vzdělávacího zařízení.

(3) Škola nebo školské či vzdělávací zařízení jsou oprávněny požadovat, aby jim autor školního díla z výdělku jím dosaženého v souvislosti s užitím díla či poskytnutím licence podle odstavce 2 přiměřeně přispěl na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložily, a to podle okolností až do jejich skutečné výše; přitom se přihlídně k výši výdělku dosaženého školou nebo školským či vzdělávacím zařízením z užití školního díla podle odstavce 1.

## **ABSTRAKT**

Diplomová práce se zabývá testováním kompozitních materiálů, vyrobených odlišnou technologií a vystavených vlivu vlhkosti i teploty. U vzorků byla realizována série testů statické zkoušky ohybem. Výsledky byly vyhodnoceny a následně mezi sebou graficky porovnány.

Klíčová slova: Kompozit, prepreg, vlhkost, teplota, mechanické vlastnosti

## **ABSTRACT**

The diploma thesis deals with testing of composite materials produced differently technology and exposed to both humidity and temperature. A series of static bending test tests was performed on the samples. The results were evaluated and then compared graphically.

Keywords: Composite, prepreg, humidity, temperature, mechanical properties

Tímto bych chtěl poděkovat mému vedoucímu diplomové práce panu Ing. Milanu Žaludkovi, Ph.D. za jeho vstřícný postup, ochotu, trpělivost a čas, který mi věnoval.

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

Dále také prohlašuji, že na diplomové práci (dále jen DP) jsem pracoval samostatně a použitou literaturu jsem citoval a zmínil na konci této DP.

# OBSAH

<b>ÚVOD</b> .....	<b>11</b>
<b>I TEORETICKÁ ČÁST</b> .....	<b>12</b>
<b>1 KOMPOZIT</b> .....	<b>13</b>
1.1 HISTORIE.....	13
1.2 DEFINICE.....	14
1.3 ZÁKLADNÍ VLASTNOSTI KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ .....	14
1.3.1 Homogenita a nehomogenita.....	14
1.3.2 Izotropie a anizotropie.....	14
1.3.3 Synergický efekt.....	15
1.4 TECHNOLOGIE VÝROBY .....	16
1.4.1 Ruční nanášení .....	16
1.4.2 Vakuové lisování.....	18
<b>2 PREPREG</b> .....	<b>20</b>
2.1 CHARAKTERISTIKA MATRICE.....	23
2.1.1 Reaktivní pryskyřice .....	24
2.2 CHARAKTERISTIKA VÝZTUŽE .....	25
2.2.1 Druhy vazeb .....	25
2.2.2 Přírodní vlákna .....	26
2.2.3 Skleněná vlákna .....	26
2.2.4 Uhlíková vlákna .....	27
2.2.5 Plastová vlákna.....	28
2.2.6 Keramická vlákna.....	28
2.2.7 Kovová vlákna .....	28
<b>3 VLIV TEPLoty A VLHKOSTI NA MECHANICKÉ VLASTNOSTI</b> ....	<b>29</b>
3.1 VLIV TEPLoty .....	30
3.1.1 Skleněné vlákno .....	30
3.1.2 Uhlíkové vlákno .....	31
3.1.3 Matrice .....	32
3.1.4 Statické zkoušky.....	32
3.2 VLIV VLHKOSTI .....	33
3.2.1 Matrice .....	33
3.2.2 Statické zkoušky.....	34
3.3 VLIV KOMBINACE TEPLoty S VLHKOSTÍ .....	35
3.3.1 Zvýšená teplota i vlhkosti .....	40
3.3.2 Snížená teplota a zvýšená vlhkost.....	40
3.4 VLIV PROSTŘEDÍ.....	40
<b>II PRAKTICKÁ ČÁST</b> .....	<b>42</b>
<b>4 VÝROBA ZKUŠEBNÍCH TĚLES</b> .....	<b>43</b>
4.1 VÝROBA TĚLES RUČNÍ LAMINACÍ .....	43
4.1.1 Postup výroby.....	43
44	
4.1.2 Vytvrzení v peci .....	45



4.2	VÝROBA TĚLES PREPREGU TECHNOLOGIÍ LISOVÁNÍ.....	45
4.3	NAŘEZÁNÍ ZKUŠEBNÍCH TĚLES .....	47
<b>5</b>	<b>TESTOVÁNÍ VZORKŮ .....</b>	<b>48</b>
5.1	OHYBOVÁ ZKOUŠKA DLE ČSN EN ISO 14125 .....	49
5.2	TĚLESA VYTVRZENÁ NA VZDUCHU .....	51
5.2.1	Modul pružnosti v ohybu .....	51
5.2.2	Pevnost v ohybu .....	52
5.2.3	Poměrná deformace při mezi pevnosti .....	53
5.2.4	Deformační práce .....	54
5.3	TĚLESA VYTVRZENÁ V PEČI.....	56
5.3.1	Modul pružnosti v ohybu .....	56
5.3.2	Pevnost v ohybu .....	57
5.3.3	Poměrná deformace při mezi pevnosti .....	58
5.3.4	Deformační práce .....	59
5.4	TĚLESA VYTVRZENÁ V PEČI A PONOŘENÁ V H <sub>2</sub> O PO DOBU 500H.....	61
5.4.1	Modul pružnosti v ohybu .....	61
5.4.2	Pevnost v ohybu .....	62
5.4.3	Poměrná deformace při mezi pevnosti .....	63
5.4.4	Deformační práce .....	64
5.5	TĚLESA VYTVRZENÁ NA VZDUCHU A PONOŘENÁ V H <sub>2</sub> O PO DOBU 500H.....	66
5.5.1	Modul pružnosti v ohybu .....	66
5.5.2	Pevnost v ohybu .....	67
5.5.3	Poměrná deformace při mezi pevnosti .....	68
5.5.4	Deformační práce .....	69
5.6	TĚLESA VYTVRZENÁ V PEČI A PONOŘENÁ V H <sub>2</sub> O PO DOBU 1000H.....	71
5.6.1	Modul pružnosti v ohybu .....	71
5.6.2	Pevnost v ohybu .....	72
5.6.3	Poměrná deformace při mezi pevnosti .....	73
5.6.4	Deformační práce .....	74
5.7	TĚLESA VYTVRZENÁ NA VZDUCHU A PONOŘENÁ V H <sub>2</sub> O PO DOBU 1000H....	76
5.7.1	Modul pružnosti v ohybu .....	76
5.7.2	Pevnost v ohybu .....	77
5.7.3	Poměrná deformace při mezi pevnosti .....	78
5.7.4	Deformační práce .....	79
<b>6</b>	<b>VYHODNOCENÍ NAMĚŘENÝCH HODNOT.....</b>	<b>81</b>
6.1	SKELNÝ KOMPOZIT .....	81
6.1.1	Modul pružnosti v ohybu .....	81
6.1.2	Pevnost v ohybu .....	82
6.1.3	Poměrná deformace při mezi pevnosti .....	83
6.1.4	Deformační práce .....	84
6.2	PREPREG.....	85
6.2.1	Modul pružnosti v ohybu .....	85
6.2.2	Pevnost v ohybu .....	86
6.2.3	Poměrná deformace při mezi pevnosti .....	87
6.2.4	Deformační práce .....	88

6.3	UHLÍKOVÝ KOMPOZIT .....	89
6.3.1	Modul pružnosti v ohybu .....	89
6.3.2	Pevnost v ohybu .....	90
6.3.3	Poměrná deformace při mezi pevnosti .....	91
6.3.4	Deformační práce .....	92
<b>ZÁVĚR .....</b>		<b>93</b>
<b>SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....</b>		<b>95</b>
<b>SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....</b>		<b>97</b>
<b>SEZNAM OBRÁZKŮ .....</b>		<b>98</b>
<b>SEZNAM PŘÍLOH.....</b>		<b>103</b>

## ÚVOD

Kompozitní materiály v dnešní době patří mezi velmi rozšířené a významný sortiment pro výrobu konstrukcí všech odvětví. Od počátku své existence se výroba kompozitního materiálu posunula na velmi vysokou úroveň. Je používán u sportovního náčiní, strojů, stavebnictví, ale také převážně u dopravních prostředků, které dopravují jednoho či několik desítek lidí tisíce kilometrů. Z toho důvodu je zapotřebí dbát precizní výrobě a pečlivě testovat jednotlivé vzorky při extrémních podmínkách, kterým jsou výrobky v reálném provozu vystavovány.

Teoretická část diplomové práce je rozdělena na tři základní části. První část popisuje krátce historii kompozitních materiálů, dále definici co to je kompozitní materiál a jak je v technické praxi označován. Následně jsou zde základní informace a vlastnosti zmíněného materiálu. V neposlední řadě je popsána výroba, která byla použita v praktické části diplomové práce. Druhá část je věnována materiálům zhotovených technologií lisováním, nazývané jako prepregy, následné jejich rozdělení a výroba. Také jsou zde druhy matric a výztuží, které byly zapotřebí při výrobě testovaných vzorků. Poslední třetí část je věnována problematice vlivu vlhkosti a teploty na mechanické vlastnosti kompozitů. Jsou zde podrobně popsány účinky na jednotlivé části kompozitu.

Praktická část zprvu popisuje samotnou výrobu desek technologií ruční laminace a lisování. Poté je krátce zmíněna firma, u které byly nařezány testovací vzorky vodním páprskem. Jako poslední je zde testování samotných vzorků a popis normy, dle které probíhalo testování ve školní laboratoři. Naměřené hodnoty byly vyneseny do jednotlivých grafů a okomentovány. Následně byly grafy porovnány a vyhodnoceny.

## **I. TEORETICKÁ ČÁST**

# 1 KOMPOZIT

## 1.1 Historie

Již od počátku evolučního vývoje, který trvá 3,5 miliardy let, jsou realizovány materiály na principu kompozitu. S látkami, které jsou čisté a homogenní, se setkáváme spíše ojediněle. Existuje celá řada materiálů, jak v živočišné tak v rostlinné biologii, které existují pro svoji danou funkci a druh namáhání. Spojení všech druhů materiálů dohromady je neekonomické, jelikož poměrně velké množství zůstává nevyužito během funkce daného materiálu. Je zapotřebí vytvořit takové strukturní složení, aby při selhání jednoho členu, funkce druhého umožnila zabránit katastrofickým poruchám.

V historii lidstva se můžeme setkat s velkou škálou kompozitních materiálů, které byly využívány převážně pro stavby, kde se jedná spíše o zkušenosti daných lidí, než znalostí.

Pro výstavbu obydlí se používala hlína a jíl. Po přidání kousku slámy, či jiných rostlinných prvků, došlo k výraznému zpevnění dané konstrukce, a také ke zlepšení vlastností jako je například dobrý odvod vlhkosti. Velmi známým a starým kompozitem je malta a beton, které byly používány již z doby římské. Kompozit se vyskytuje také v konstrukci zbraní. Mezi první uživatele kovových kompozitů jsou považováni Američtí Indiáni, kteří rozkládali platinu do zlata a stříbra kvůli její teplotě ke zpracování.

Ve 20. století nastal významný pokrok z pohledu vyztužení betonu ocelí, asfaltové granulární směsi či azbestocementovými výrobky a pryží vyztuženými černými sazemi, nebo různými druhy vláken. Pevnost plastu byla zaručena přidáním skelnými, či jinými vlákny. Nyní se v řadě technologií vyskytují kov a keramika.

Příklad, který je velmi známý, je kompozit z *damascenské oceli*. Je složen z plátků středně uhlíkové a vysokouhlíkové oceli. [3]



Obrázek 1 Damascová ocel [18]

## 1.2 Definice

Definice kompozitu se nejčastěji uvádí jako: „*Kterýkoliv materiál, obsahující dva a více složek, lze považovat za kompozit.*“ Tato definice je ovšem pravdivá pouze do jisté míry, a to z důvodu, že by sem patřily téměř všechny přírodní látky a látky vytvořené člověkem. Kompozit tedy není jen sloučenina dvou a více složek, výsledná struktura musí mít lepší vlastnosti, než jsou vlastnosti jednotlivých složek, ze kterých se daný kompozit skládá. Proto je lepší použít definici: „*Kompozity jsou heterogenní materiály, kde po sloučení materiálů, dojde k vytvoření jediné struktury a při doplňování jednotlivých vlastností vzniká kompozitní materiál s přídatnými, či lepšími vlastnostmi, než mají dané složky samy.*“ Tuto definici je možno zapsat v matematické podobě a vztah zní:

$$(A) + (B) = (C) \quad (1)$$

(A) a (B) jsou dva různé materiály a (C) je nový materiál s lepšími vlastnostmi, než vlastnosti původních složek.

Jednotlivé fáze ovlivňují výsledné vlastnosti materiálu, a to nejen jejich charakteristikami, ale také jejich vzájemným působením. Interakce je to, co vytváří nové kvality materiálu, které bychom u jednotlivých složek nebyli schopni dosáhnout. Technologie nám umožňuje zvýraznit výhodné vlastnosti složek, a ty nevýhodné potlačit, záleží na potřebách daného prvku či konstrukce. [3]

## 1.3 Základní vlastnosti kompozitních materiálů

Řadí se sem *homogenita, izotropie a synergický efekt.*

### 1.3.1 Homogenita a nehomogenita

Každý technický materiál je v atomárním měřítku nehomogenní. V kompozitním materiálu se dbá na to, aby nehomogenity byly ve větším měřítku, než je atomární. To znamená, že kompozit je uvnitř nehomogenní, ovšem z hlediska makroskopického je homogenní.

### 1.3.2 Izotropie a anizotropie

V technické praxi jsou materiály zcela izotropní. U kompozitu tomu tak není, velká řada se vyznačuje jako materiály se silnou anizotropií. S anizotropií je vždy nutné počítat, protože pevnost matrice ve směru a kolmo na vlákna může být odlišná o několik řádů.

**Izotropní materiál** má ve všech směrech stejné vlastnosti. Koncové body zatížené na směrových vektorech by vytvořily kouli.

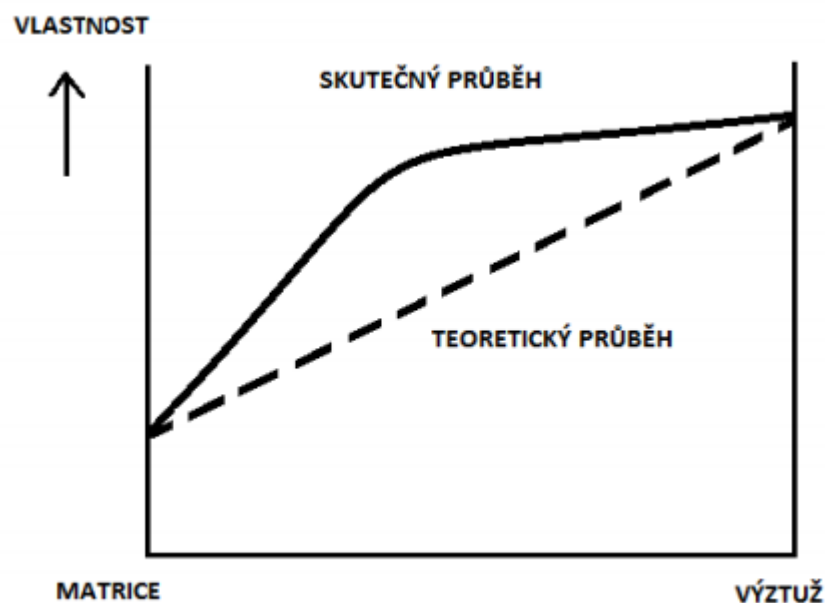
**Anizotropní materiál** je charakteristický různými vlastnostmi v jednotlivých směrech. Koncové body zatížené na směrových vektorech by vytvořily obecnou plochu.

**Pseudoizotropní materiál** je znám také jako *kvaziizotropní*, má vlastnosti stejné ve směru tří kolmých základních os. Koncové body by vytvořily krychli.

**Příčně izotropní materiál** má izotropní vlastnosti v určité rovině. Vlastnosti jsou symetrické podle této roviny a také podle dvou rovin, které jsou na ni i na sebe kolmé. Koncové body tvoří rotační elipsoid.

### 1.3.3 Synergický efekt

Dochází k němu v kompozitu, kdy při kombinaci pozitivních vlastností jednotlivých složek dojde k přesáhnutí poměrného součtu složek. [7]



Obrázek 2 Synergický efekt [7]

Snahou je udělat kompozitní materiál tak, aby synergický efekt byl co nejsilnější, a to převážně na těch vlastnostech, kde to nejvíce potřebujeme. [7]

## 1.4 Technologie výroby

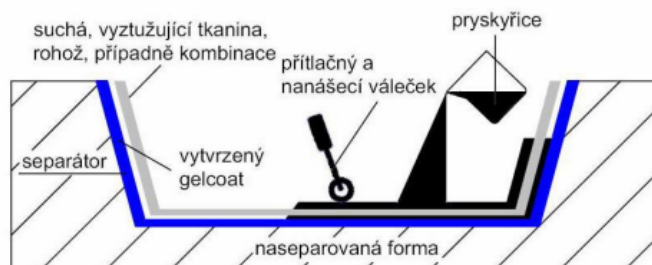
Abychom věděli, kterou metody zvolit, je zapotřebí znát tvarovou náročnost daného výrobku, počet vyrobených kusů a druh použitých materiálů, jak výztuže, tak i matrice. V menším měřítku budou volbu technologie ovlivňovat výsledné vlastnosti výrobku. Jedná se o mechanické a povrchové vlastnosti. Do výrobního procesu bude jako první vstupovat výztuž, a to ve formě polotovaru. Může být ve formě vlákna, rohože či ve formě prepregu. Následně je dodávána matrice v kapalné formě.

Výrobní postupy můžeme dělit:

- a) Ruční postup
- b) Částečně automatizovaný
- c) Plně automatizovaný
- d) Kontinuální postup
- e) Speciální technologie [1]

### 1.4.1 Ruční nanášení

Řadí se mezi nejstarší metody výroby kompozitu. Je známo také jako kontaktní lisování, kde pryskyřice i výztuž jsou nanášeny ručně na daný povrch formy. Ta má pozitivní či negativní tvar. Zvláštnost tohoto procesu je ta, že pouze jedna strana výrobku má kvalitní povrch. V první řadě je forma povrchově upravena. Následuje *gel coat*, za případu, je-li ho potřeba, poté se přidává pryskyřice a výztuž. Následně je další vrstva přitlačena válečkem, a tím dojde k odvodu přebytečného vzduchu. Proces kladení a válečkování se opakuje, dokud nedosáhneme požadované tloušťky vrstvy. Naposled dojde k vytvrzení při pokojové teplotě a následné vyjmutí z formy. [11,10]



Obrázek 3 Ruční kladení [12]



**Výhody:**

- V první řadě je to jednoduchost celého procesu a možnost vyrábět téměř všechny tvary.
- Minimální náklady na nástroje a celého výrobního procesu.
- Jednoduché dokončovací operace a flexibilita konstrukce.

**Nevýhody:**

- Vzniklý odpad, kterého je velké množství, nelze použít pro větší množství opakování.
- Pouze jeden povrch je kvalitní.
- Náročnost na lidskou práci, kde zkušenosti výrazně ovlivňují kvalitu daného povrchu.
- Nízké mechanické vlastnosti

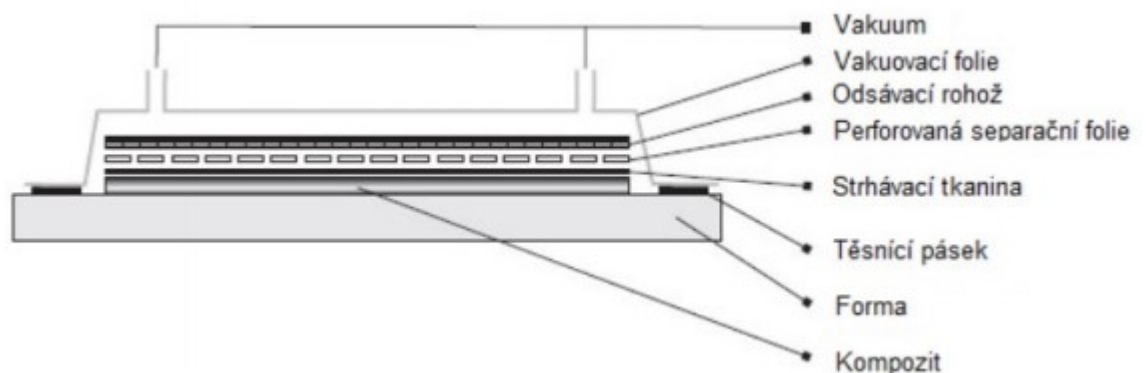
Je to metoda sloužící pro výrobu lodí, velkoobjemových skladovacích nádrží, bazénů a různých další prototypů. [10]

*Tabulka 1 Vlastnosti výrobků vyrobených ručním nanášením [11]*

<b>Vlastnost/parametr</b>	<b>Výztuž ve formě rohože</b>	<b>Tkaná výztuž</b>
Obsah skla (%)	20 - 40	45 - 55
Pevnost v tahu (MPa)	70 – 140	210 - 350
Pevnost v ohybu (MPa)	140 - 280	360 - 520
Modul pružnosti v tahu (GPa)	6 - 13	10 - 31

### 1.4.2 Vakuové lisování

Jedná se o rozšíření metody ručního nanášení, kde za pomoci vakua působí na horní stranu laminátu tlak, díky čemuž dochází k lepšímu spojení jednotlivých částí. Tlak je vytvořen pod povlakem z plastické hmoty, který je na horní straně laminátu a utěsněn těsnicí páskou. Vakuovou pumpou je vzduch odsáván přes odsávací hadice, čímž vznikne podtlak v celém systému.



Obrázek 4 Vakuové lisování [13]

#### Použité materiály:

- *Pryskyřice:* Jedná se převážně o epoxidové a fenolické pryskyřice. Polyesterové a vinyloxyesterové se moc nepoužívají z důvodu možného nasátí styrenu z daného laminátu.
- *Jádra:* Vakuové lisování je vhodné pro všechny druhy jader.
- *Vlákna:* Tlak, který je vyvinut pumpou, je vhodný pro použití téměř všech druhů vláken.

#### Výhody:

- Jedná se o bezpečnou technologii, která není pro obsluhu zdravotně závadná. Všechny nežádoucí látky jsou zachyceny pod vakuovou fólií.
- U vícevrstvých laminátů, můžeme dosáhnout vyššího obsahu tkanin oproti normálnímu nanášení pryskyřice.
- Díky vyššímu tlaku lze dosáhnout dobrého prosycení vláken pryskyřicí, kde přebytečná vrstva pryskyřice je vytlačena do absorpční vrstvy.
- Jsme schopni dosáhnout většího vyplnění obsahu laminátu.

**Nevýhody:**

- Nutno vyšší zručnosti dělníků
- Množství obsahu pryskyřice v laminátu je velmi obtížné kontrolovat, převážně záleží na zkušenostech dělníků.
- Cena je poměrně vysoká, a to z důvodu množství spotřebovaného materiálu a pracovní síly.

Touto metodou se zhotovují dílce pro vojenské a letecké součástky, kde na prvním místě není cena, ale fyzikální vlastnosti. [11]

*Tabulka 2 Vlastnosti výrobků vyrobených vakuovým lisováním [11]*

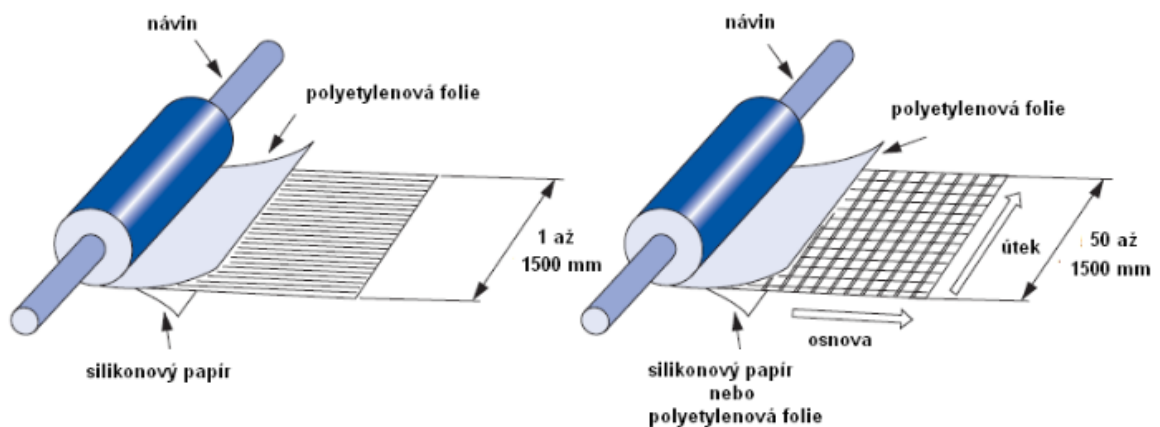
<b>Vlastnost/parametr</b>	<b>Výztuž ve formě rohože</b>	<b>Tkaná výztuž</b>
Obsah skla (%)	40	55 - 60
Pevnost v tahu (MPa)	140 – 160	350 – 400
Pevnost v ohybu (MPa)	280	400 - 620
Modul pružnosti v tahu (GPa)	13 - 17	25 - 36

## 2 PREPREG

Prepreg je již předem předimpregnovaná výztuž, která se používá při výrobě kompozitního materiálu, a to jak při výrobě dílů lisováním, tak při výrobě dílů v autoklávu. Jeho velkou výhodou je oddělení složitého procesu prosycování výztuže pojivem od dalšího zpracování. Výroba se provádí na speciálních zařízeních, při daných podmínkách. Jedině tak se dá dosáhnout požadované kvality a vlastnosti daného budoucího výrobku. [1]

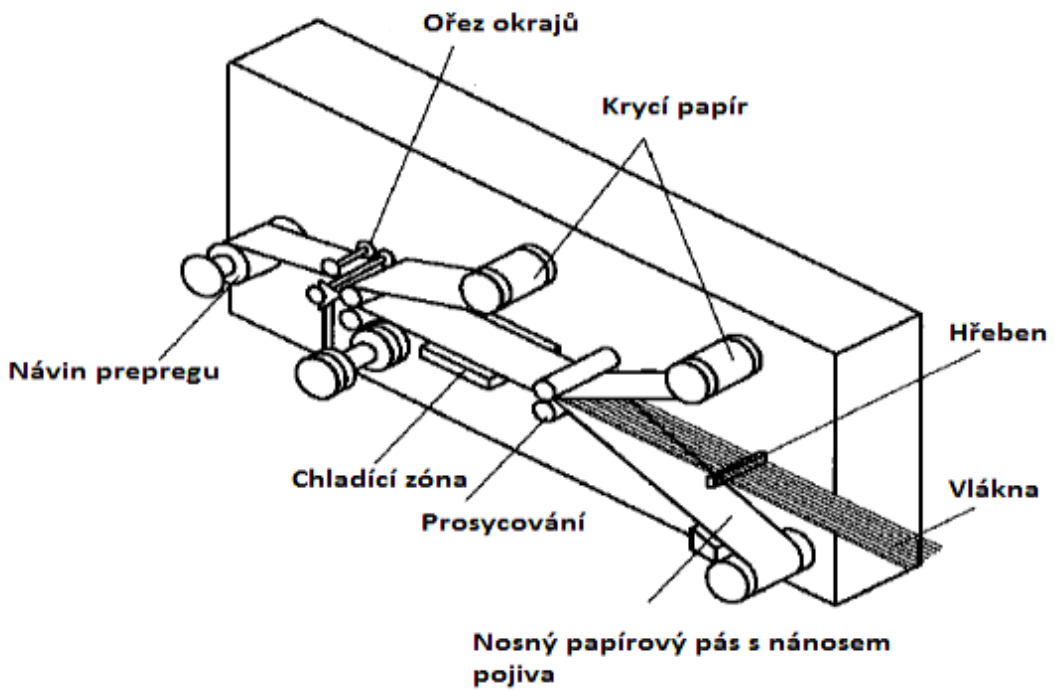
Dle orientace vláken výztuže lze prepreg rozdělit na dvě základní skupiny:

- a) Jednosměrné
- b) Vícesměrné [8]

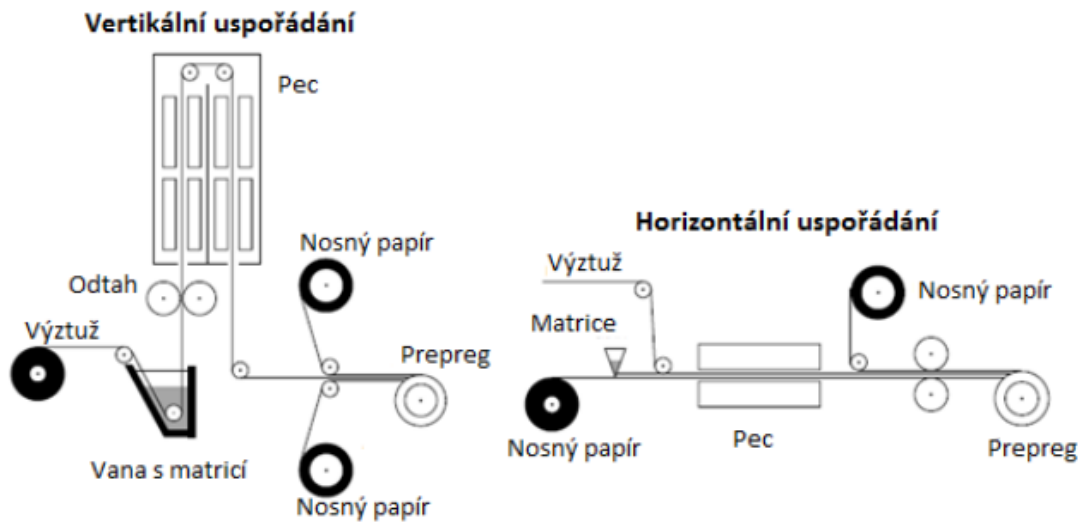


Obrázek 5 Jednosměrně a vícesměrně orientovaný prepreg [8]

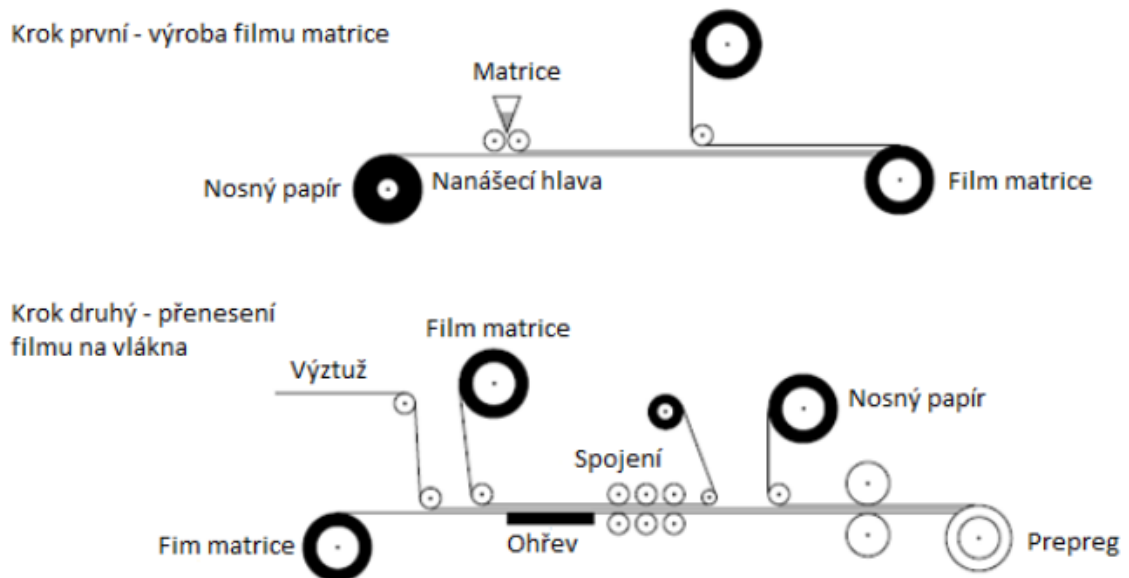
Výroba jednosměrně vyztuženého prepregu je znázorněna na obrázku (Obrázek 5). Pramence vláken se odvíjejí ze stojanu, který je opatřen cívkami, a jsou rovnoběžně rovnány přes stavitelný hřeben. Takto srovnané pásy se pokládají na papírový nosič, který již obsahuje silikonovou vrstvu. Na ni byla již dříve nanášena určitá vrstva pryskyřice. Pás je dále veden mezi pásy ohříváné teplem a zde dochází k prosycení výztuže pojivem. Pro spuštění tohoto procesu je zapotřebí teploty a tlaku. Výsledným prvkem je pás prepregu, který je prosycen pryskyřicí a je oboustranně chráněn nosným papírovým pásem. Následuje ochlazení, čímž dojde k zastavení vytvrzovací reakce. Na konec celé operace je prepreg nařezán na požadované délky a skladován pomocí navíjecího zařízení. [1]



Obrázek 6 Výroba jednosměrně orientovaného prepregu [1]



Obrázek 7 Jednokroková výroba prepregu [8]



Obrázek 8 Dvoukroková výroba prepregu [8]

Tyto výrobky se nazývají *jednosměrné prepregy* a to z důvodu, že všechny vlákna jsou uložena rovnoběžně. [1]

Prepregy obsahující termosetické pojivo, které se musí před dalším zpracováním skladovat při teplotě  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  a maximální doba skladování je 6 měsíců. Přibližně 6 hodin před následným zpracováním se musí rozmrazit. Tento proces je nutné provést pokud možno bez přístupu vzduchu, z důvodu sražení vzdušné vlhkosti na povrchu prepregu. Jejich povrch je za normální teploty lehce lepkavý. Tuto vlastnost lze zvýšit nahřátím. Teplota ovšem musí být maximálně  $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ . [1]

Sériová výroba, jako je například v letectví, je z velké části automatizována. Prepreg ve formě pásu je ukládán pomocí číslicově řízených zařízení. Výroba je tedy z finančního hlediska levná, ale také ji lze snadno opakovat. [1]

Jejich samotné zpracování se provádí vytvrzováním v autoklávu, či metodou lisování ve vakuu. Lze ho také zpracovat metodou lisování ve vyhřáté formě. [1]

## 2.1 Charakteristika matrice

Její hlavním úkolem je spojovat vyztužující fázi a také přenášet zatížení. V neposlední řadě chrání před okolními vlivy. Její poměrné prodloužení by mělo být větší, než mezní prodloužení výztuže.



Obrázek 9 Matrice jednotlivých materiálů [4]

Z obrázku (Obrázek 9) lze vyčíst, že keramická a grafitová matrice má poměrné prodloužení menší než uhlíkové vlákno. Nejsnáze se kompozit vyrábí, jestliže je matrice v kapalném stavu. Zde je zapotřebí dbát na dva základní pojmy, jako je *povrchová energie a viskozita*. Je tedy nutné, aby kapalná matrice měla co nejmenší povrchovou energii. Do této kategorie se řadí epoxidová pryskyřice.

Matrice může být rozdělena do několika skupin:

- Polymerní
- Kovová
- Keramická
- Uhlíková
- Skleněná
- Sklokeramická

V dnešní době se nejčastěji používají pryskyřice, a to *polyesterové a epoxidové*. Jejich velká výhoda je, že při normálních teplotách jsou v tekutém stavu a jejich viskozita je nižší než tavenina termoplastů.

Plasty, které tvoří matrici, můžeme rozdělit do dvou základních skupin, jsou to *termoplasty* a *reaktoplasty*. Termoplasty se po zahřátí na určitou teplotu stávají měkkými a přechází do taveniny. Jejich velká výhoda je, že jsou opakovatelně zpracovatelné. Naproti tomu reaktoplasty nelze opakovatelně zpracovat. Makromolekuly jsou spojeny do husté sítě a s narůstající teplotou se nemohou roztavit, a také zvyšují svou tuhost. V kompozitech se nejčastěji vyskytují reaktivní pryskyřice. [4]

### 2.1.1 Reaktivní pryskyřice

Mohou být kapalné či tavitelné. Tyto pryskyřice se vytvrzují polymerací bez odštěpení těkavých látek, a to buď samostatně, nebo za pomoci tvrdidel (iniciátory, urychlovače a aldehydy). Reaktivní pryskyřice můžeme také nazývat jako *laminační*, *impregnační*, *zalévací* či *prosyčovací*.

Do této skupiny můžeme zařadit pár typů pryskyřic, a to:

- *Nenasycené polyesterové pryskyřice (UP-R)*: Jedna složka je nenasycená karbová kyselina a další je alkohol. Pryskyřice je rozpouštěna v rozpouštědle (styren).
- *Vinylesterová* či *fenakrylátová pryskyřice (VE-R; PFA-R)*: Tato pryskyřice je také rozpouštěna v monomerním rozpouštědle, jako *UP-R*.
- *Epoxidová pryskyřice (EP-R)*: Obsahuje dostatečné množství epoxidových skupin, které slouží k vytvrzení.
- *Fenolické pryskyřice*: Jsou vyráběny kondenzací vodných roztoků a fenolů.
- *Metakrylátové pryskyřice (MA-R)*: Jsou vyráběny z polymerizované směsi polymerních a monomerních esterů kyseliny metakrylátové. [1]

#### Nenasycené polyesterové pryskyřice (UP-R)

Jsou charakteristické tím, že jsou bezbarvé, či slabě nažloutlé. Při vytvrzování je uvolňováno reakční teplo a hodnota objemového smrštění činí 5 – 9 %. Tato pryskyřice patří mezi nejvíce rozšířené v aplikaci, a to z důvodu nízké viskozity, vysoké rychlosti vytvrzování, nízké ceny a dobrého smáčení vláken.

Tyto pryskyřice jsou známé od roku 1936 a ve výrobě kompozitu se používají v 70 %. [1]



### Vinylesterové pryskyřice (VE-R)

Na rozdíl od *UP-R* se liší tím, že pomocí koncových metakrylátových skupin, kde se nachází esterové vazby, dochází k zesíťování. Tyto pryskyřice se vyznačují vysokou houževnatostí, dobrou odolností proti alkalickému prostředí a nízké tvarové stálosti za tepla.

Vzhledem ke kratším molekulovým řetězcům je jejich viskozita nižší a vyšší stupeň zesíťení. Jsou také křehké a odolné vůči vyšším teplotám. [1]

### Epoxidové pryskyřice (EP-R)

Za normálních teplot jsou kapalné až pevné. Mohou obsahovat pomocné látky jako například rozpouštědla. Tyto pryskyřice mají velmi dobré mechanické vlastnosti, vysokou rozměrovou stálost a dobrou přilnavost. Používá se převážně jako zalévací hmota pro elektroniku, výrobu forem a nástrojů, či na různé povlaky jako je práškové nanášení. [1]

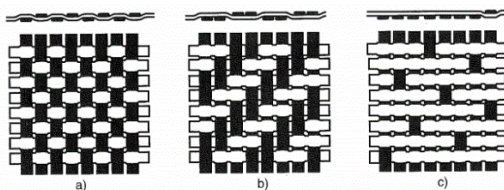
### Fenolické pryskyřice (PF-R)

Vyrábí se kondenzací fenolů a 30 – 50 % vodných roztoků aldehydů. Tyto pryskyřice se vyznačují nízkou viskozitou, rychlou dobou tvrdnutí a odolností proti vysokým teplotám. Jsou odolné proti hoření. [1]

## 2.2 Charakteristika výztuže

### 2.2.1 Druhy vazeb

- Plátňová vazba – Jedná se o velmi jednoduchou a základní vazbu. Vyniká dobrou rozměrovou stálostí a při jejím řezání se tvoří pouze malé otřepy
- Keprová vazba – Její pevnost a tuhost je o něco vyšší než u předešlé vazby, a to z důvodu menšího zvlnění vláken. Keprová vazba je vhodná pro tvarové prvky, z důvodu více ohebnějších vláken.
- Atlasová vazba – Nazývá se také *saténová*. Oproti keprové vazby má menší vychýlení vláken. Z důvodu dobré řasitelnosti je vhodná pro použití prostorově složitých prvků. Jejich výhodou je velmi hladký povrch. [1]



Obrázek 10 Druhy vazeb výztužných materiálů [1]

V kompozitech se nachází různá škála druhů vláken. Mohou to být:

- Přírodní vlákna
- Skleněná vlákna
- Uhlíková a grafitová vlákna
- Plastová vlákna
- Keramická vlákna
- Kovová vlákna

### 2.2.2 Přírodní vlákna

Mohou mít dobré vlastnosti. Patří sem například bavlna, konopí, juta či len. Pavoučí vlákno má mez pevnosti 11400 MPa a tažnost 31 % (při průměru 0,02 – 7  $\mu\text{m}$ ) [7]

Jsou charakteristické dobrou navlhavostí. Pro jejich lepší adhezi se v praxi používá úprava plazmou. [1]

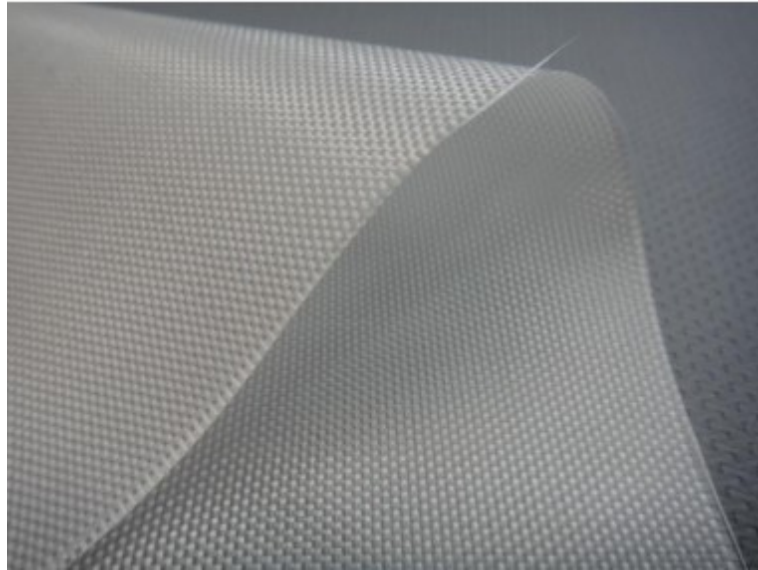
Tabulka 3 Vlastnosti přírodních vláken [7]

Vlákno	Hustota (g/cm <sup>3</sup> )	Mez pevnosti (MPa)	Youngův modul (GPa)	Tažnost (%)
Konopí	1,5	460	70	1,7
Juta	1,3	440	60	2,0
Len	1,5	340	100	1,8
Bavlna	1,5	300	27	10

### 2.2.3 Skleněná vlákna

Nazývána také jako textilní, jsou tenká vlákna s průměrem 3,5 – 24  $\mu\text{m}$ . Jsou tažena z roztavené skloviny. Označují se také jako E-vlákna, z důvodu vysoké propustnosti záření. Jsou výborným elektrickým izolantem. Na rozdíl od uhlíkových či aramidových vláken mají izotropní vlastnosti. [1]

Jejich hustota je kolem 2,5 g / cm<sup>3</sup> s vlastnostmi podobnými jako hliník, E = 80 – 100 GPa. Vlákna jsou charakteristická malou odolností proti únavě. Tepelnou odolnost mají výrazně nižší než oceli. Také jejich tepelná roztažnost je dvakrát menší než ocel. [7]



*Obrázek 11 Skelné vlákna [14]*

#### **2.2.4 Uhlíková vlákna**

Vyrábí se metodou zvanou pyrolýza. Je to tepelný rozklad organických vláken v inertní atmosféře. Teplota se pohybuje kolem 2000 °C. Při výrobě kvalitních vláken jsou výchozí suroviny vlákna z polyakrylonitrilu. Tato vlákna se používají pro lehké konstrukce, jako jsou například letadla. Kompozity s uhlíkovými vlákny jsou velmi lehké, pevné a tuhé. Jejich nevýhodou je jejich vysoká cena a také cena samotného výrobku.[6]



*Obrázek 12 Uhlíkové vlákna [14]*

### 2.2.5 Plastová vlákna

Jsou to vlákna na bázi lineárních organických polymerů. Jejich vazby jsou orientovány podle osy. Tyhle vlákna se mohou použít u všech druhů reaktivních pryskyřic i termoplastů. Lze využít až 70 % jejich skutečné pevnosti. Používají se převážně jako náhrada azbestu v třecích a brzdových obloženích a výztuže pro pneumatiky. Jejich nevýhodou je citlivost na působení vody.

Jejich hustota je  $1 \text{ g / cm}^3$ . Plastová vlákna mají malou tuhost a středně vysokou pevnost. Nejznámější je *kevlar*. Jeho pevnost činí kolem 2,8 GPa. Jsou odolná vůči chemikáliím a za přítomnosti kyslíku degradují účinkem UV záření. [1,7]

### 2.2.6 Keramická vlákna

Charakteristická je vysoká teplotní odolnost a stabilita. Používá se s keramickou či kovovou maticí. Výhoda je vysoká tuhost. Vydrží větší tlak oproti uhlíku, skla a aramidu. Tato vlákna jsou většinou poměrně krátká a také velmi štíhlá. [7]

Výroba se skládá ze tří kroků:

1. Materiál je připraven v tekuté formě jako viskózní suspenze nebo koloidní roztok
2. Z něj jsou vytlačována vlákna libovolného průřezu
3. Odpaří se voda a vlákno je stabilizováno do krystalického stavu za působení vysoké teploty okolo  $1200 \text{ }^\circ\text{C}$ . [3]

### 2.2.7 Kovová vlákna

Jsou velmi levná, avšak váhově nejtěžší. U žáruvzdorných materiálů se používají wolframová vlákna. Můžeme sem zařadit *borová vlákna*, ta jsou velmi lehká, tuhá a pevná. Jejich výroba je ovšem velmi obtížná. Na tenký wolframový drát se nanáší chemickou depozicí borová vrstva. Jejich povrch je chráněn vůči oxidaci.

Postupem času se vědci snaží o vývoj skelných kovů, tyto materiály představují zcela novou třídu. [7,3]

### 3 VLIV TEPLoty A VLHKOSTI NA MECHANICKÉ VLASTNOSTI

Vliv prostředí na mechanické vlastnosti může být komplexní. Může být kladný i záporný, závisí na materiálu, skladbě i druhu zatěžování. Dochází ke změnám porušování. V leteckém průmyslu je získání dat o chování kompozitních materiálů v extrémních podmínkách nejpodstatnější a také časově nejnáročnější. Kombinace vlhkosti a teploty se považuje za nehorší možné podmínky, které vedou ke snížení statických pevností až o 30%.

**ASTM D5229 / D5229M – 14** – je norma popisující standardní zkušební metody pro vlastnosti absorpce vlhkosti a rovnovážné kondicionování polymerních matric kompozitních materiálů.

*Gravimetrická zkušební metoda* – Slouží pro monitorování změny obsahu vlhkosti materiálu v čase měřeném změny celkové hmotnosti zkušebních kuponů, které byly vystaveny určitému prostředí společně se zkušebními tělesy. [19]

Mechanismy se aplikují za určitých teplot a servisní službě daného zkoušeného materiálu. [17]

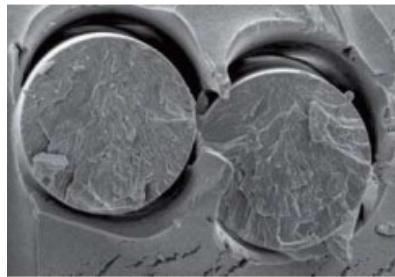
Degradační mechanismy	Nejdůležitější proměnné	Modelový přístup	Způsoby akcelerace testů	Současné zaměření výzkumu
Trhlinkování matrice (rozdíl mezi koef. tepelné roztažnosti)	Parametry zpracování, obor teplot, cyklů, statické a dynamické zatížení, cykly vlhkoštního a teplotního zatížení, tloušťky vrstev, zbytková napětí	Modely akumulace poškození	Zvýšení teploty, oboru cyklování, aplikovaného napětí	Vlivy vlhkosti a rychlosti změn, rozdíly mezi vratnými a nevratnými změnami
Teplotní degradace a oxidace (redukce mol. váhy)	Teplota, koncentrace kyslíku, doba vystavení účinkům, modely přesunu hmot	Modely reakční kinetiky	Zvýšení teploty, koncentrace kyslíku	Vliv trhlinkování matrice, chem. modely degradace, definice dominantní degradační reakce
Hydrotermální degradace (Residuální napětí, delaminace vnějších vrstev, puchýřkování)	Teplota, koncentrace vlhkosti, rychlost zahřívání	Modely difuze vlhkosti	Zvýšení teploty, vlhkosti, cyklů sorpce	Vliv vlhkosti na zbytkovou napjatost, desorpční jevy, gradienty vlhkosti, vlivy trhlinek matrice a zavedených napětí
Separace fází a mikro-strukturální změny	Doba vystavení účinkům, teplota, vlhkost		Zvýšení teploty, vlhkosti	Modely mikrostrukturální charakterizace, modely rozpustnosti

Obrázek 13 Kritické degradační mechanismy polymerních kompozitů [17]

### 3.1 Vliv teploty

Samotná teplota je v praxi mnohem závažnější než vlhkost. Vysoká teplota má vliv na lom až někde blízko teploty skelného přechodu. Naopak nízká teplota ovlivňuje pnutí v důsledku záporné roztažnosti v podélném směru vláknem. To vede k roztahování vlákna a smrštění matrice, tím vzniká velké pnutí na rozhraní. Dochází k degradaci na rozhraní vlákno/matrice, a také k dělení svazků vláken.

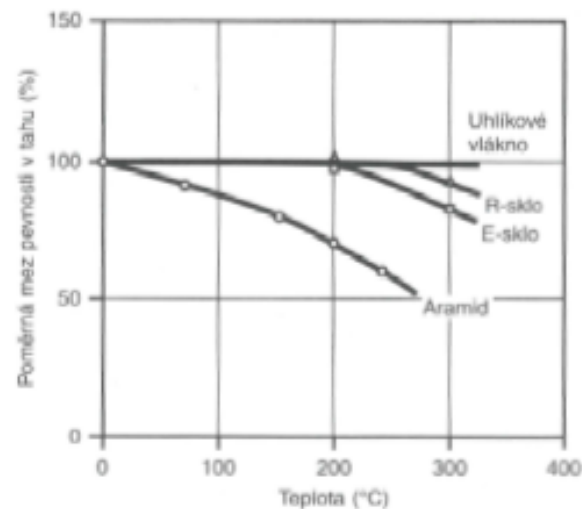
U skla nastává pokles pevnosti vláken od teploty okolo 200 °C, u uhlíku to je teplota 450° [15, 19]



Obrázek 14 Porušení rozhraní vlákno/matrice [15]

#### 3.1.1 Skleněné vlákno

U skleněného vlákna klesá jeho celková pevnost s rostoucí teplotou. Tento děj se odehrává od teploty okolo 200 °C. [15]



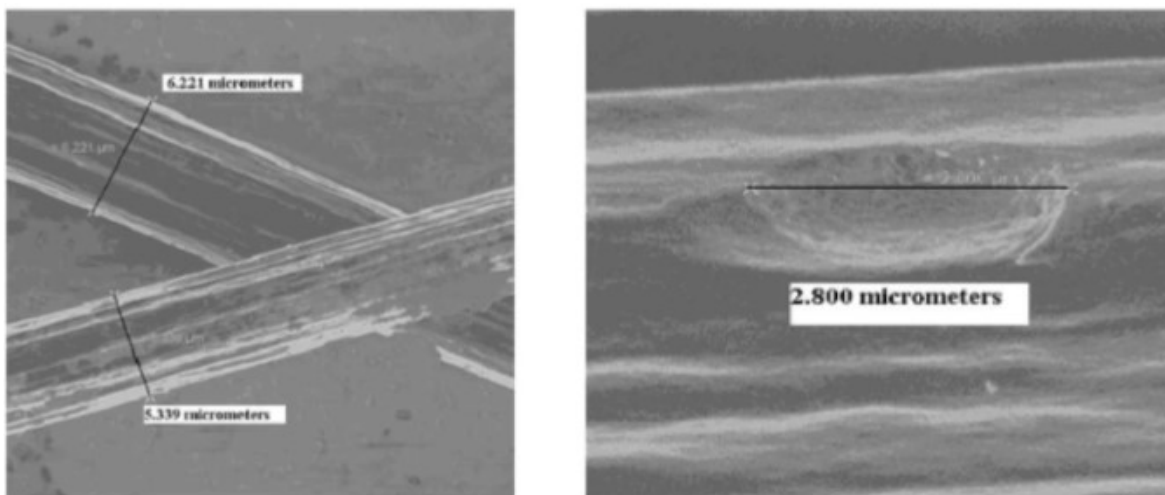
Obrázek 15 Vliv teploty na pevnost [15]

### 3.1.2 Uhlíkové vlákno

Podobně jako u skleněného vlákna, pevnost klesá s rostoucí teplotou, tato teplota je okolo 450°C. Zhruba do teploty 170 °C je hodnota degradace tak nízká, že ji můžeme zanedbat. [15]

Tabulka 4 Vliv teploty na pevnost [15]

2 hodiny	22°C	350°C	450°C	600°C
Flaw size [nm]	26	29	43	500
Síla [MPa]	5470	5200	4270	1253



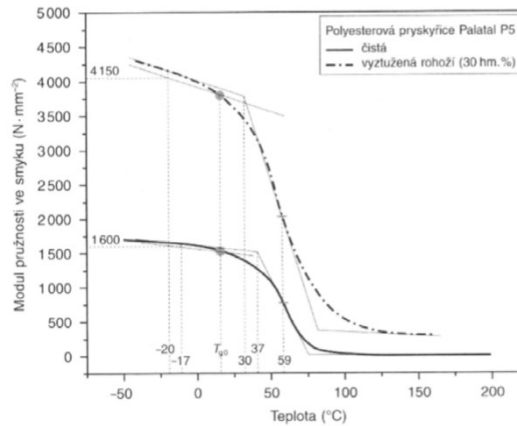
Obrázek 16 Průřez vláknem při 600 °C po dobu 2 hodin [15]

Pokud je kompozit vystaven normálnímu prostředí při relativně nízkých teplotách, je jeho pevnost nezávislá na době působení. Pokud působíme na materiál v průběhu jeho samotné zkoušky, má prostředí větší vliv než při vystavení těmto podmínkám před zkouškou. [15]

Jejich povrch obsahuje velkou škálu reaktivních skupin umožňujících spojení matrice s vlákny. Jejich vyšší napětí také zlepšuje adhezi, a to převážně vlivem oxidace polárního podílu. Oxidovaná vlákna jsou upravena kyselými skupinami. [1]

### 3.1.3 Matrice

Pevnost matrice zřetelně klesá s rostoucí teplotou. Nastává jev, kde dojde k rozkladu matrice, a tím k snížení pevnosti i tuhosti. V krajním případě při působení vysokých teplot po dlouhou dobu, může dojít k odpařování matrice. [15]

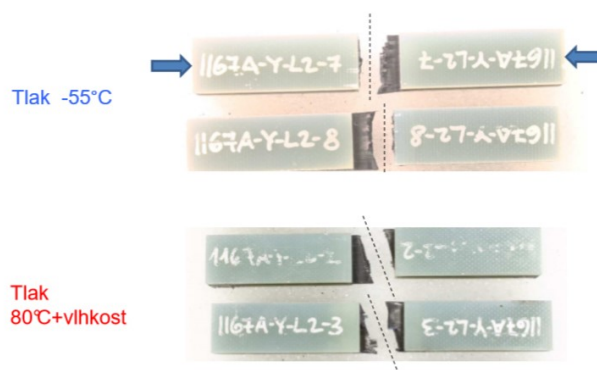


Obrázek 17 Vliv teploty na matrici [15]

### 3.1.4 Statické zkoušky

Při statické zkoušce tlakem dochází ke změně způsobu porušení. Matrice je měkčí po vyvolání lokálního vzpěru, stačí menší rozsah delaminací. Při tlaku dochází k místnímu porušení v malých oblastech. Teplota má výrazný vliv, snížená odolnost delaminací.

Uhlíkový vzorek při záporných hodnotách vykazuje podélné přerušování, naopak vzorek vystaven vysokým teplotám a vlhkosti, má lom kolmý. [15]



Obrázek 18 Vliv teploty na porušení vzorku při tlakové zkoušce [15]



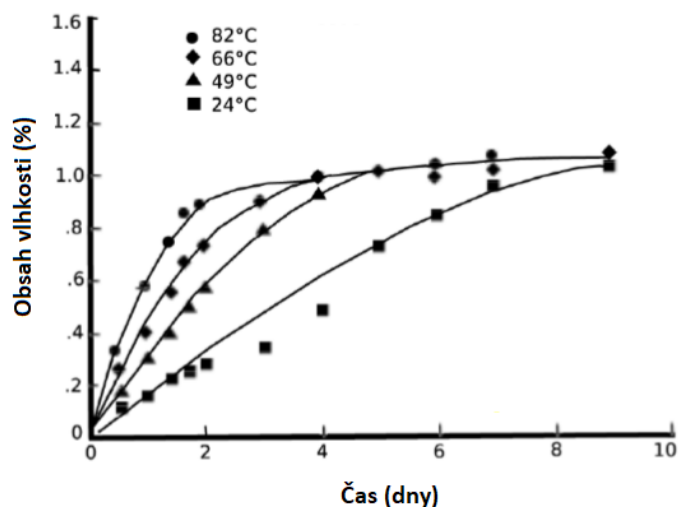
## 3.2 Vliv vlhkosti

Vlhkost jako nepříznivý parametr plastizuje, bobtná a absorbuje ji matrice. Naopak výztuž pohlcuje vlhkost výrazně méně. Při vlhčení agresivní látkou, může dojít ke zkřehnutí matrice. Zvýší se zesíťování, a tím dojde ke vzniku mikrotrhlin. Úroveň, která se navýší přes tyto mikrotrhliny, následně degraduje ještě výrazněji. V samotné praxi ovšem dojde velmi zřídka k naprostému nasycení celé součásti. [15]

Samotná uhlíková vlákna i jejich rozhraní s matricí nejsou vlhkostí nějak výrazně ovlivněny. U skelných vláken můžeme říci, že vlákna neabsorbují vlhkost pouze jen problematické rozhraní. Vlákna, která absorbují více vlhkosti než samotná matrice, jsou aramidová.

Zvýšení prostupu vodních par roste s teplotou. Kapilární efekt nastává podél rozhraní vlákna s matricí, v samotné matrici také dochází k difuzi. [19]

### 3.2.1 Matrice



Obrázek 19 Přírůstek hmotnosti při vlhčení. [15]

Z obrázku (Obrázek 19) je patrné, že obsah vlhkosti kompozitu se zvyšující se teplotou vzrůstá.

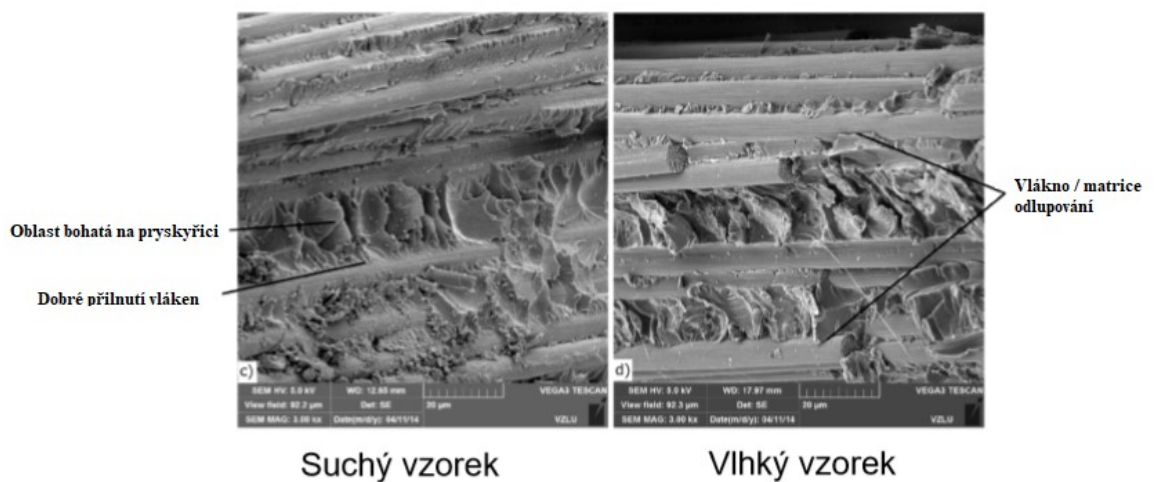
Vlhkost prostupuje difuzí v matrici. Nastává kapilární efekt podél rozhraní vlákna a matrice a to přes mikrotrhliny až po dutiny. Vnitřní pnutí může uvolnit bobtnání matrice, přičemž chemické procesy, mohou snížit přechodovou teplotu.

Při zvýšené vlhkosti může dojít k porušení:

- Plastizace matrice
- Oslabení rozhraní vlákna s matricí [19]

### 3.2.2 Statické zkoušky

Při takových zkouškách vlhkost kompozitu ovlivňuje změnu působení porušení. Matrice je měkčí, a tím i celé mechanické vlastnosti jsou nižší. Při vystavení vysoké vlhkosti může dojít v malých oblastech k lokálnímu porušení. [15]

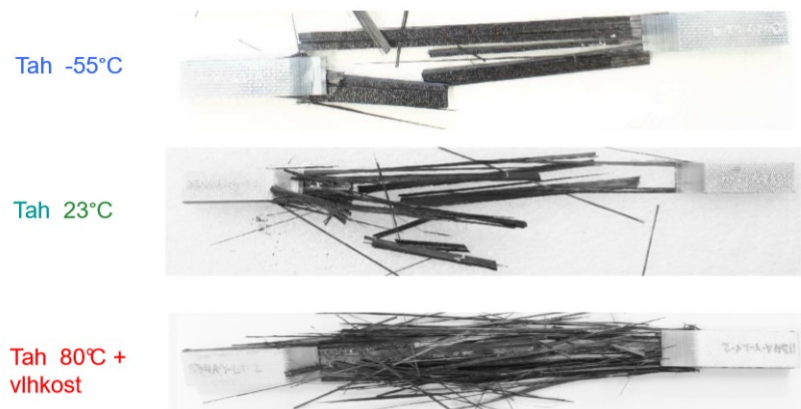


Obrázek 20 Lomová plocha [15]

Obecně můžeme říci, že vlhkost kompozitní výrobek plastizuje. V krajních případech, kdy je materiál vystaven vysokým vlhčením, může dojít ke zkrěhnutí matrice a vznikutím mikrotrhlin, které jsou s tímto spojeny.

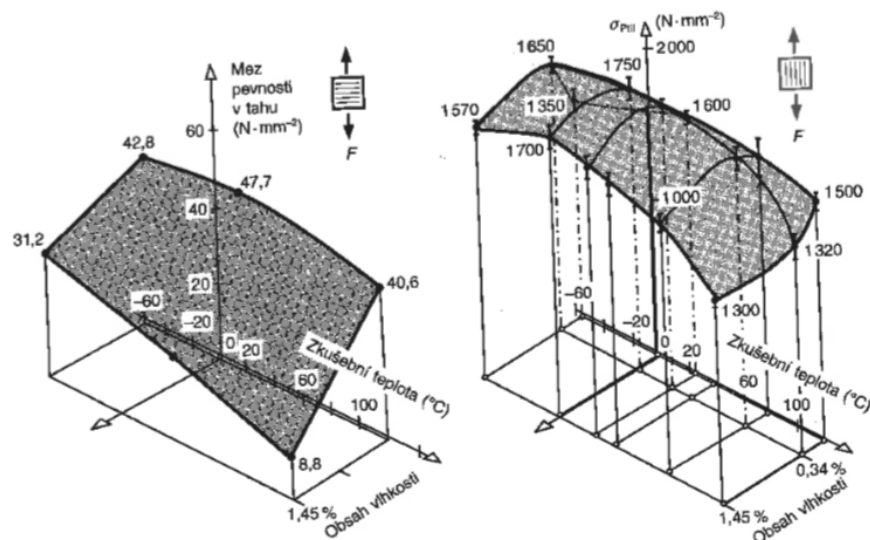
### 3.3 Vliv kombinace teploty s vlhkostí

Na obrázku (Obrázek 21) můžeme vidět, že při tahové zkoušce se zvyšující se teplotou i vlhkostí, vzorek vykazuje větší štěpení materiálu. Vzniká lom typu *koště*. [15]



Obrázek 21 Vliv teploty na porušení vzorku při tahové zkoušce [15]

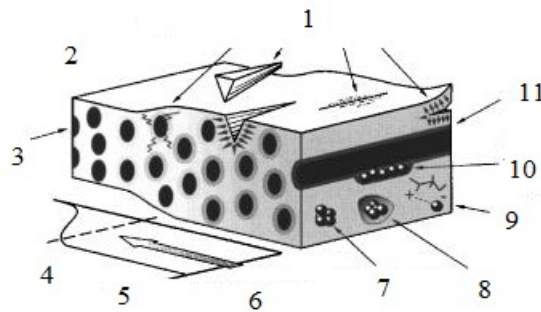
Tento efekt se zkoumá především v letectví, kde letadla jsou vystavena ve vysokých výškách extrémním podmínkám. K degradaci kompozitu dochází za letu při výšce 10 km, kde teplota je okolo  $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Následně při teplotě  $80 - 120\text{ }^{\circ}\text{C}$ , kde tato teplota je v blízkosti motoru při setrvání letadla na ranveji. V neposlední řadě dochází k degradaci při relativní vlhkosti okolo 96 %, což je v tropických oblastech. [15]



Obrázek 22 Vliv teploty a vlhkosti na mez pevnosti v tahu jednosměrných laminátů z epoxidových pryskyřic a uhlíkových vláken namáhaných rovnoběžně a kolmo ke směru vláken [1]

Polymery obsahují polární skupiny, které pohlcují vlhkost. Jelikož vlhkost snižuje pevnost spoje mezi matricí a vláknem, tak sklem vyztužené plasty hrají důležitou roli. Protože skelná vlákna jsou hydrofilní, je zapotřebí taková úprava, která reaguje s polymerem matrice, a též odstraňuje polární skupiny. U epoxidových laminátů nastává *problém vlhkého horka*, viz Obrázek 22. Ten charakterizuje tropické klima a vyznačuje se snížením pevnosti za vysokých teplot a vlhkostí. Tvarová stálost výztuže při zvýšené teplotě je další situace, kde je snaha použití polymerů jako lubrikant. [1]

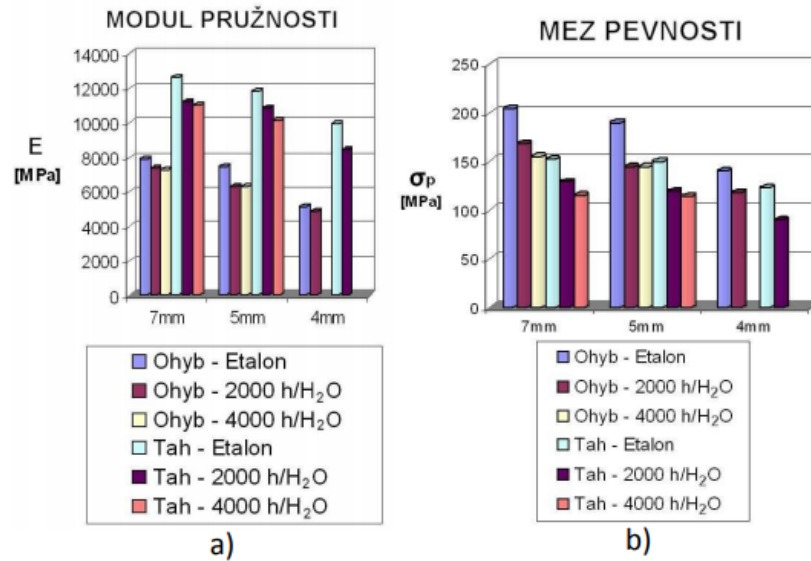
Na obrázku (Obrázek 23) je průřez kompozitu, který je vystaven vlivu vlhkosti. Je viditelné, že vlhkost nabobtná kompozit a dochází ke vzniku trhlin a dutin. [20]



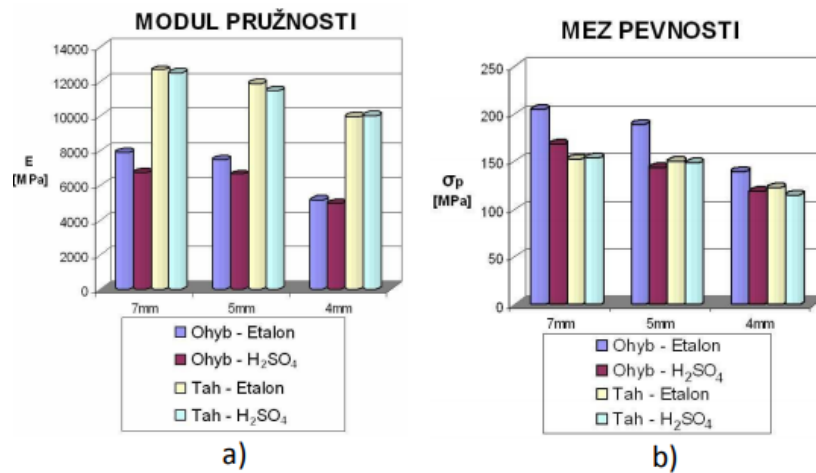
Obrázek 23 Průřez navlhčeným kompozitem [20]

- 1- Vlhkostem indukované praskliny s možnou ztrátou materiálu a zvýšeným vychytáváním v poškozené oblasti
- 2- Částečná nebo neuzavřená matrice se sníženým obsahem vlhkosti
- 3- Vlákna
- 4- Oblast matrice – vlhkost difundovaná v expandované polymerní síti
- 5- Koncentrace vody
- 6- Hlavní směr difuze: vlhkost difundující materiálem v důsledku gradientu koncentrace
- 7- Difuze vlhkosti v polymerní maticové síti je umístěna na molekulách, nebo skupinách seskupených do skupin
- 8- Vlhkost absorbována do dutin uvnitř matrice
- 9- Vlhkost vázaná na polární místa polymeru – difuze ovlivněná vazbou
- 10- Vlhkost absorbována do oblastí rozhraní výztuž / matrice
- 11- Zvýšená difuze a koncentrace vlhkosti v oblasti v oblasti rozhraní výztuž / matrice díky snížené hustotě zesílení [20]

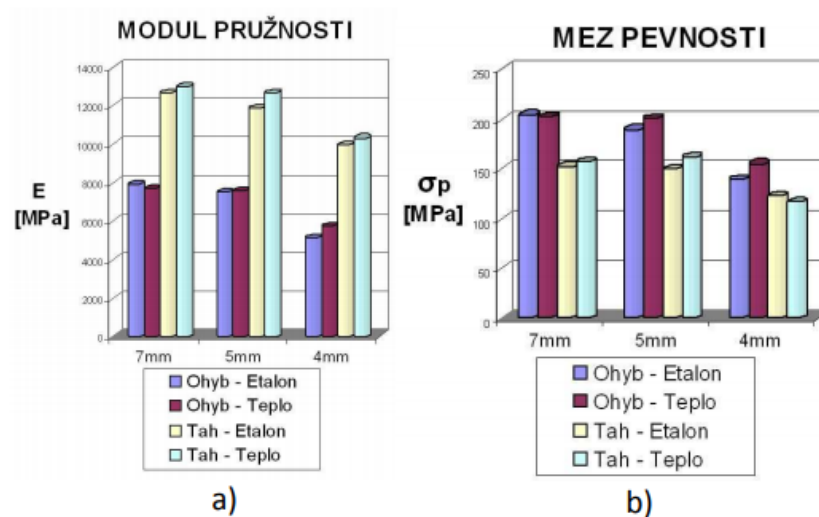
Při testování modulu pružnosti a meze pevnosti zkušební tělesa měla rozměry 1000 x 800 x 7, 1000 x 800 x 5 a 540 x 550 x 4 byla rozdělena do 4 základních složek. Doba 2000 a 4000 hodin ve vodě, což simuluje běžný stav pro provoz při krátkodobém a dlouhodobém kontaktu s vodou. Dále byly vzorky ponořeny na 500 hodin do kyseliny sírové, což charakterizuje problematiku kyselých dešťů. V neposlední řadě vzorky vystavené teplotě 150 °C na dobu 8 hodin. [16]



Obrázek 24 Modul pružnosti  $E$  a mez pevnosti  $\sigma_p$  v tahu a ohybu před (etalon) a po expozici v H<sub>2</sub>O o  $T=50^\circ\text{C}$  [16]



Obrázek 25 Modul pružnosti  $E$  a mez pevnosti  $\sigma_p$  v tahu a ohybu před a po expozici 500h v 30% H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> o  $T=23^\circ\text{C}$  [16]



Obrázek 26 Modul pružnosti  $E$  a mez pevnosti  $\sigma_p$  v tahu a ohybu před a po 8h expozici na vzduchu při  $T=150^\circ\text{C}$  [16]

Z naměřených výsledků je čitelné, že voda výrazně ovlivnila hodnoty modulu pružnosti a meze pevnosti jak v tahu, tak i v ohybu. Rozdíl doby ponechání v kapalině (2000 a 4000 h) nehraje již takovou roli. Porovnání hodnot etanolu a vody hodnoty klesají o 15 – 25 %. Kyselina sírová ovlivnila ohybové vlastnosti až o 24 %, naopak tahové vlastnosti zůstaly téměř nezměněné, to znamená, že laminát má dobrou odolnost vůči agresivnímu prostředí pouze při krátkodobém kontaktu. Při působení vysoké teploty se hodnoty lišily málo. U Laminátu se 4 mm tloušťkou došlo dokonce k 10 % zlepšení.[16]

### 3.3.1 Zvýšená teplota i vlhkosti

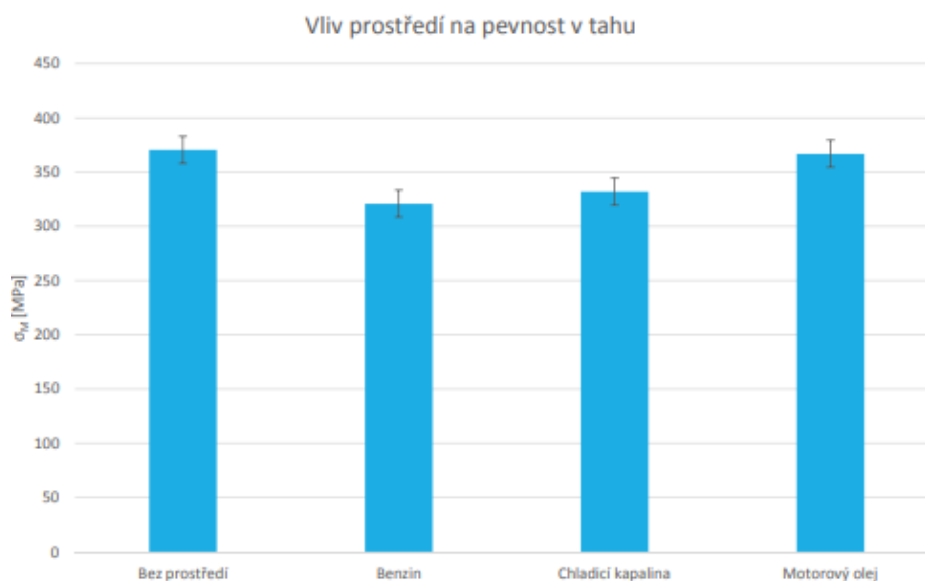
Zde dochází ke zvýšení houževnatosti kompozitu. To má za následek zvýšení křížení vláken. Vlákná kompozitu jsou častěji holá. Na lomu je efekt působení vysokých teplot i vlhkosti více patrné u houževnatých materiálů, a to z důvodu slabšího rozhraní.

### 3.3.2 Snížená teplota a zvýšená vlhkost

Za těchto podmínek se vlákno roztahuje pouze podélně. Vlhkost působí na matici a ta se roztahuje. Výskyt těchto podmínek je ojedinělý, a tudíž se v laboratořích téměř nezkouší. [15]

## 3.4 Vliv prostředí

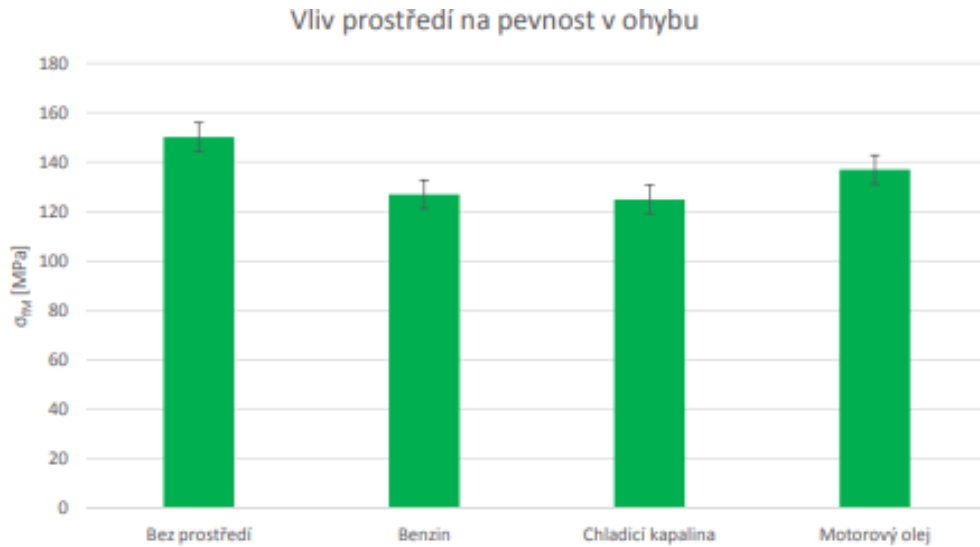
Epoxid / skloamidový laminát vyrobený technologií ruční laminací, byl ponořen do benzínu, chladicí kapaliny, motorového oleje a následně srovnán s hodnotami zatížení v normálním prostředí. [16]



Obrázek 27 Vliv prostředí na pevnost v tahu [16]

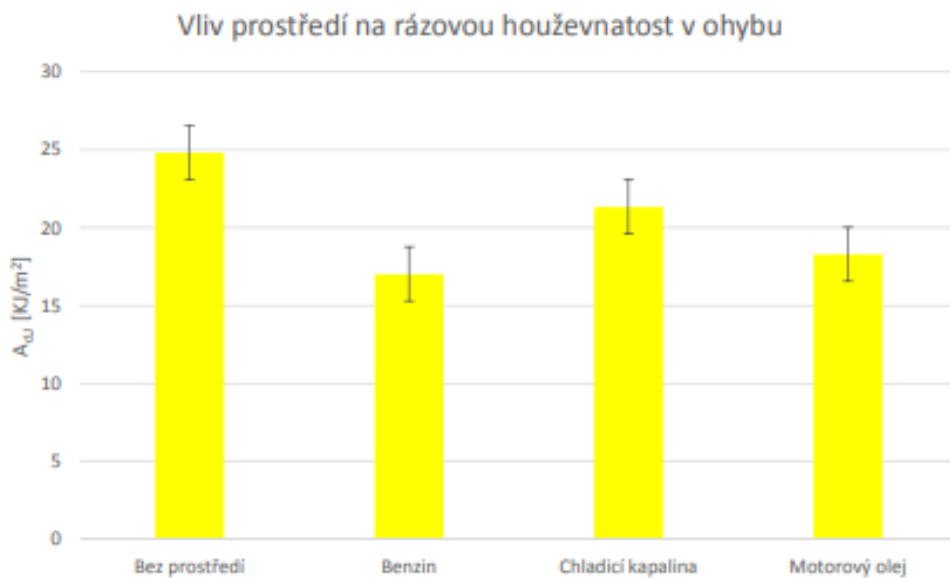
Hodnoty benzínu poklesly o 13,3 %, chladicí kapalina 10,4 % a motorový olej ovlivnil hodnoty o 1 %.





Obrázek 28 Vliv prostředí na pevnost v ohybu [16]

Hodnoty benzin a chladicí kapaliny poklesly o 15 % a hodnota motorového oleje pouze o necelých 9 %.



Obrázek 29 Vliv prostředí na rázovou houževnatost v ohybu [16]

Zde nastal největší pokles benzinu a to 31 %. Následuje motorový olej s hodnotou poklesu 26,3 % a poslední chladicí kapalina 14 %. [16]

## **II. PRAKTICKÁ ČÁST**

## 4 VÝROBA ZKUŠEBNÍCH TĚLES

Pro následné testování v jednotlivých podmínkách bylo zapotřebí vyrobit zkušební tělesa daných rozměrů, na kterých byly prováděny jednotlivé zkoušky. Výrobu lze rozdělit na dva druhy, a to ruční laminace a výroba lisováním prepregu.

### 4.1 Výroba těles ruční laminací

Pro výrobu desek, které slouží k nařezání zkušebních vzorků, byly použity následující:

- Forma: *Skleněná tabule 900 x 600*
- Matrice: *Epoxidová pryskyřice L 385 (MGS)*
- Tužidlo: *Tužidlo 285 (MGS)*
- Separáčn i vosk: *Havel Wax 60 - x3*
- Výztuž: *Skelná tkanina 280 g/m<sup>2</sup> AEROGLOSS; Uhlíková tkanina 200 g/m<sup>2</sup>*

#### 4.1.1 Postup výroby

Celý proces začíná vyleštěním formy, v našem případě, se jedná o skleněnou tabuli o rozměru 900 x 600 mm. Po důkladném odstranění nečistot a vyleštění, bylo zapotřebí nanést separáčn i vosk a následně důkladně rozetřít. Tento proces se separáčn im voskem se opakoval třikrát.



Obrázek 30 Nanášení vosku na formu

Vosk má hlavní funkci snadného vyjmutí dílce z forem. Následovalo samotné stříhání vlákna na stejné rozměry. V našem případě bylo použito 7 vrstev. Nastříhané vrstvy

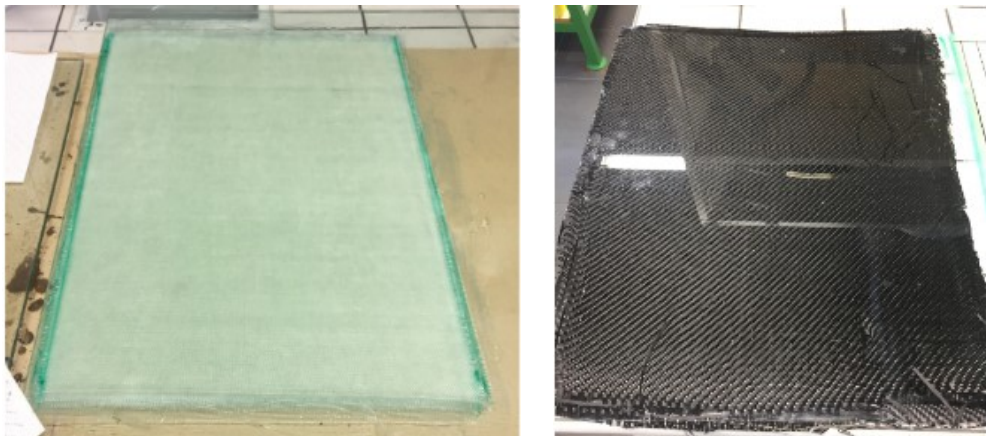
byly zváženy pro výpočet celkového množství pryskyřice a tužidla s poměrem 100:40. V ne-  
poslední řadě se tyto dvě kapaliny důkladně promíchaly.



*Obrázek 31 Nastříhaná a vážená tkanina*

Jako první se na formu za pomoci válečku nanasla první vrstva matrice, na ni se  
položila tkanina a pomocí přítlačného válečku došlo k důkladnému prosycení. Tento celý  
proces se opakoval sedmkrát.

Vytvrzení kompozitní desky o rozměrech 400 x 500 mm ze skleného vlákna probí-  
halo za pokojové teploty po dobu jednoho dne.



*Obrázek 32 Tabule skelného a uhlíkového kompozitu*

#### 4.1.2 Vytvrzení v peci

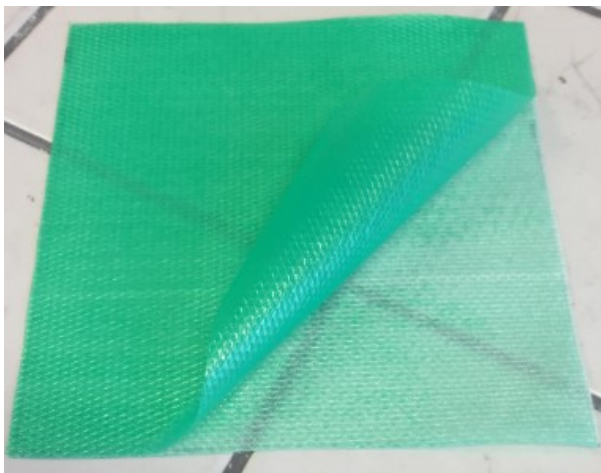
Vytvrzení zkušebních vzorků proběhlo ve školní troubě *FAGOR*. Jelikož zkušební tělesa vytvrzená na vzduchu se vyznačují nižšími hodnotami, půlku všech těles jsme vytvrzili v peci z důvodu porovnání vlivu použité technologie.

### 4.2 Výroba těles prepregu technologií lisování

Pro výrobu desek, které slouží k nařezání zkušebních vzorků, bylo použito následující:

- Forma: *Kovové desky 200 x 200 mm*
- Prepreg: *VV430U-DT806R-34 (H124 cm)*
- Ruční lis: *EMG; SAREL ČSN EN 60439-1*
- *Separátor: pečící papír*

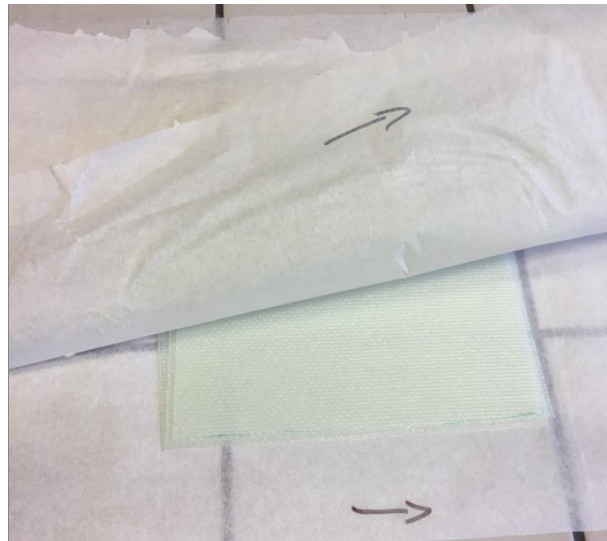
Vstupní základní surovinou byl prepreg smotaný do role a uložen v chladicím boxu o stálé záporné teplotě. Před začátkem samotné výroby bylo zapotřebí prepreg vytáhnout v dostatečném předstihu a nechat jej na pokojové teplotě důkladně rozmrazit. Mezitím se zahříval lis na teplotu 150 °C.



Obrázek 33 Nastříhaný prepreg

Kovové desky o rozměru 200 x 200 mm posloužily jako forma, nesměly obsahovat žádné nečistoty a musely být vybroušeny do hladkého povrchu z důvodu, aby povrch hotového prepregu byl dokonalý. V první řadě se na formu položil pečící papír o větším rozměru

než je samotná forma, a to z důvodu zabránění vytečení pryskyřice do prostoru lisu. Poté bylo nanášeno sedm vrstev prepregu na sebe ve stejném směru.



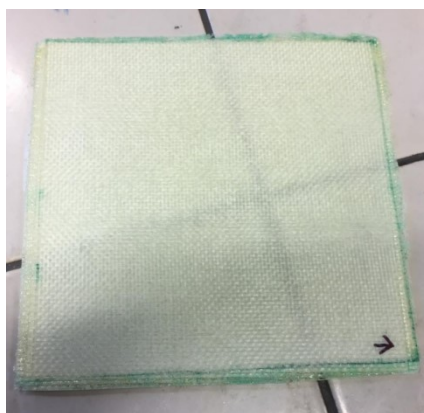
*Obrázek 34 7 vrstev prepregu uložených v pečícím papíře*

Následovala horní vrstva pečícího papíru a druhá polovina formy. Pečící papír musel být hladkou stranou k prepregu, poté jej šlo velmi lehce sundat.



*Obrázek 35 Ruční lis*

Doba vytvrzení v lisu činila 15 minut. Šipky na papíru i na prepregu značí směr orientace vláken.



Obrázek 36 Hotový výrobek

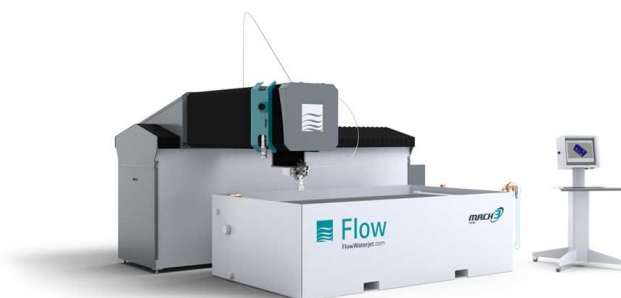
### 4.3 Nařezání zkušebních těles

Zkušební vzorky nařezala firma *Karel Kaňák s.r.o.* se sídlem společnosti v Rohatci, za pomoci vodního paprsku *Flow Mach3 Waterjet*. Ten byl zvolen oproti laseru, a to z důvodu lepší kvality řezaného povrchu, a také materiál není vystaven vysokým teplotám.

Firma se zabývá výrobou výsekových, vylupových a rozlamovacích nástrojů. Dále vyrábí razící stočky sloužící pro vytvoření slepotisku nebo Braillova písma. Většinu svých výrobků následně dodává pro potřeby papírenského průmyslu.

Parametry:

- Rychlost řezání: 7,6 m / min
- Rychlost pojezdu: 12,7 m /min
- Přesnost opakovaného najetí: 0,05 mm
- Zdvih v ose z: 150 mm, 178 mm (podle použité technologie)



Obrázek 37 Vodní paprsek Flow Mach3 Waterjet

## 5 TESTOVÁNÍ VZORKŮ

Testování vzorků probíhalo ve školní laboratoři při pokojové teplotě na zkušebním stroji Zwick 1456

Parametry:

- Maximální posuv příčnicku: 800 mm/min
- Snímače síly: 2,5 a 20 kN
- Teplotní komora: -80 / +250 °C
- TestExpert software: Tah / Tlak / Ohyb



Obrázek 38 Zkušební stroj Zwick 1456

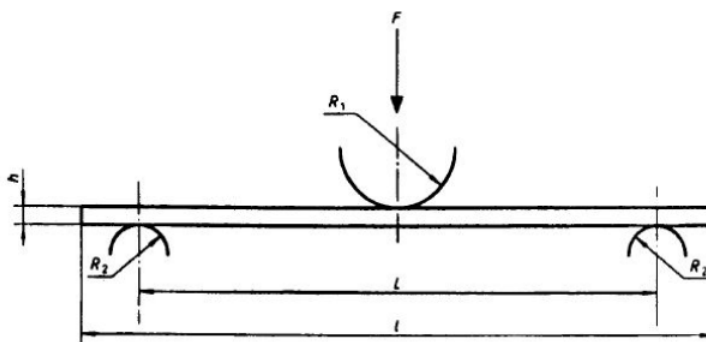
Testované vzorky můžeme rozdělit na dvě skupiny. Vytvrzené na vzduchu a vytvrzené v peci. Od každého byly vzorky dále rozděleny na ty, které nejsou vystaveny žádné vlhkosti, nebo jsou ponořeny do vody na dobu 500 hodin a na 1000 hodin. Měření probíhalo při 4 odlišných teplotách (-30, 25, 50 a 80 °C).



## 5.1 Ohybová zkouška dle ČSN EN ISO 14125

Tato norma vyháází z ISO 178 a je určena pro vlákny vyztužené plastové kompozity. Zahrnuje rovněž zkušební podmínky používané při zkoušení sklem vyztužených plastů. Zkušební podmínky jsou proti ISO 178 rozšířeny a předepisují ohyboví zatěžování třibodové a čtyřbodové. Popisují rovněž podmínky pro pojiva používaná v kompozitech obsahujících nové typy vláken, jako jsou uhlíková a aramidová.

Počet zkušebních těles musí být nejméně 5. Pokud se požaduje větší přesnost výsledků průměrné hodnoty, je možno provést větší počet měření. Výsledky zkoušek, při kterých se tělesa poruší mimo střední třetinu vzdálenosti mezi podpěrami u třibodové zkoušky, musí být vyloučena a místo nich zkoušena nová tělesa.



Obrázek 39 Uspořádání třibodového zatěžování

### Zkušební rychlost:

Tabulka 5 Zkušební rychlost

Rychlost (mm/min)	Tolerance (%)
0,5	±20
1	±20
2	±20
5	±20
10	±20
20	±10
50	±10
100	±10
500	±10

V našem případě byla zkušební rychlost 20 mm / min, kde samotné měření modulu probíhalo při rychlosti 1 mm/ min.

### Zatěžovací trny a podpěry

Podpěry a středový zatěžovací trn jsou uspořádány podle třibodového zatížení. Poloměry  $R_1$  a  $R_2$  musí odpovídat tabulce (Tabulka 6 Rozměry zatěžovacích trnů). Osy podpěr a zatěžovacího trnu musí být rovnoběžné.

Tabulka 6 Rozměry zatěžovacích trnů

Rozměry	Hodnota (mm)
$R_1$	$5 \pm 0,2$
$R_2$ pro $h \leq 3$ mm	$2 \pm 0,2$
$R_2$ pro $h > 3$ mm	$5 \pm 0,2$

Pro naši zkoušku zatěžovací trny měly hodnotu poloměru 2 mm, což jsou hodnoty trnů podepírajících zkoušené těleso.

Rozměry těles a vzdálenost mezi podpěrami jsou vypsány v tabulce (Tabulka 7). Zde hodnoty pro skelný a uhlíkový kompozit jsou odlišné. Všechny hodnoty jsou v mm.

Tabulka 7 Zkušební tělesa pro třibodový ohyb

Materiál	Délka tělesa (l)	Vzdálenost podpěr (L)	Šířka (b)	Tloušťka (h)
Třída III příčné (90°) jednosměrné kompozity; jednosměrné (0°) a vícesměrné kompozity (např. systémy se skleněnými vlákny)	60	40	15	2
Třída IV jednosměrné (0°) a vícesměrné kompozity (např. systémy s uhlíkovými vlákny)	100	80	15	2
Tolerance	+10	$\pm 1$	$\pm 0,5$	$\pm 0,2$

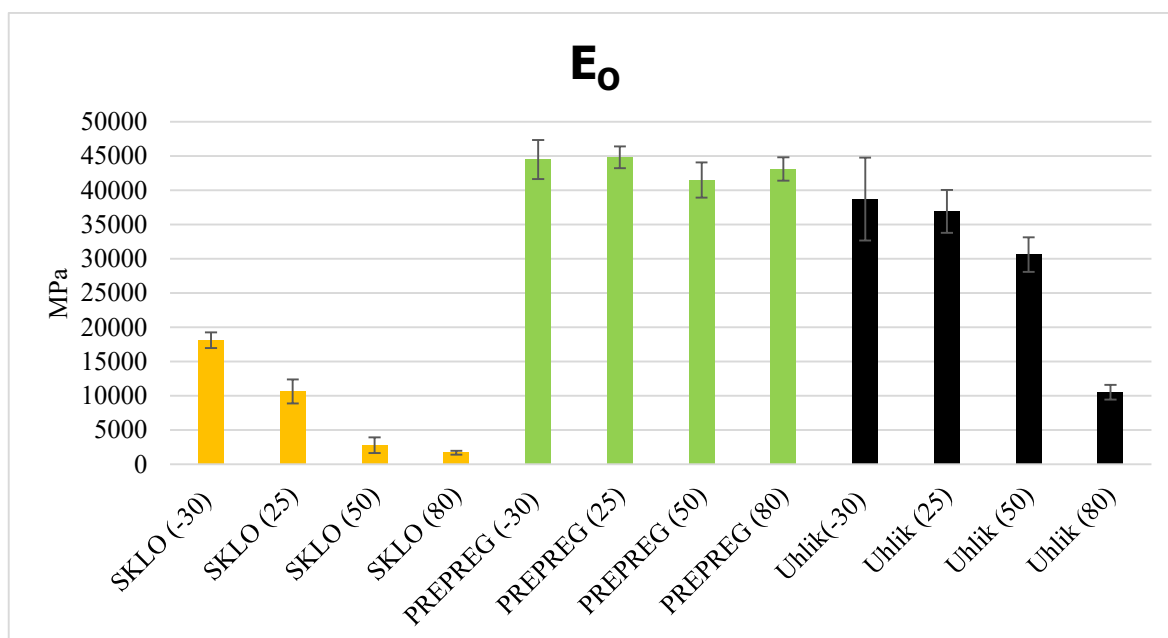
## 5.2 Tělesa vytvrzená na vzduchu

### 5.2.1 Modul pružnosti v ohybu

V tabulce (Tabulka 8) jsou vypsány hodnoty modulu pružnosti testovaných těles vytvrzených na vzduchu.

Tabulka 8 Hodnoty modulu pružnosti v ohybu těles vytvrzených na vzduchu

Zkoušená série	Průměrná hodnota MPa	Směrodatná odchylka MPa	Zkoušená série	Průměrná hodnota MPa	Směrodatná odchylka MPa
Sklo -30 °C	18100	1141	Prepreg 50 °C	41500	2573
Sklo 25 °C	10600	1750	Prepreg 80 °C	53100	1690
Sklo 50 °C	27600	1148	Uhlík -30 °C	38700	6058
Sklo 80 °C	1660	291	Uhlík 25 °C	36900	3138
Prepreg -30 °C	44500	2585	Uhlík 50 °C	30600	2530
Prepreg 25 °C	44800	1579	Uhlík 80 °C	10500	1073



Obrázek 40 Graf modulu pružnosti v ohybu těles vytvrzených na vzduchu

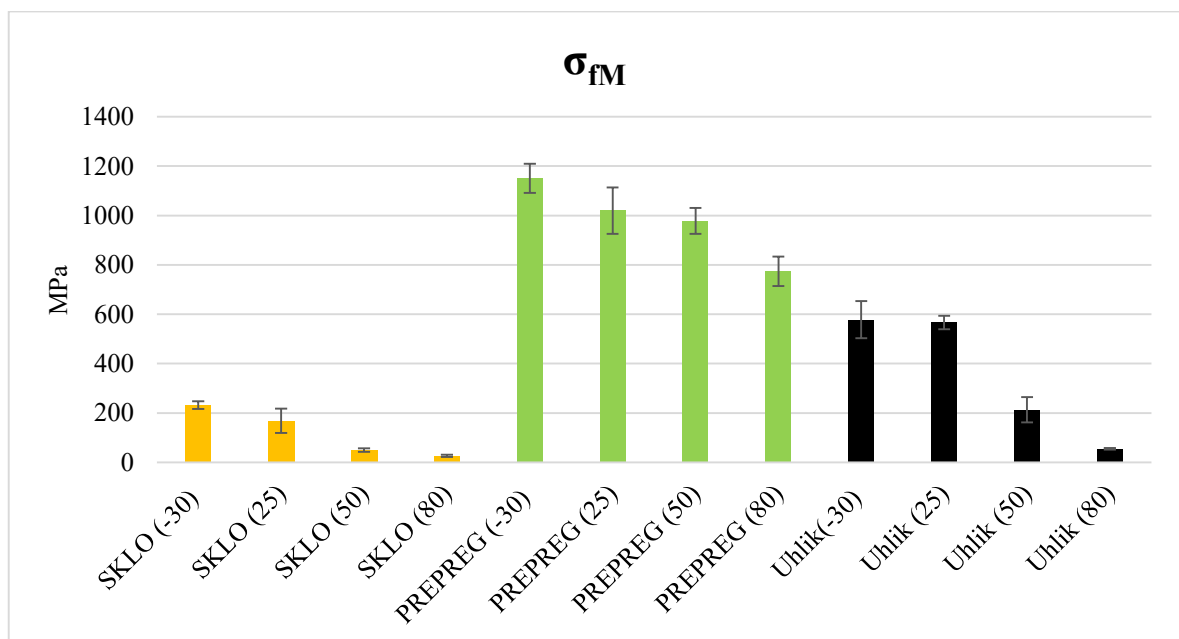
Hodnoty skelného kompozitu s rostoucí teplotou výrazně klesají. U uhlíku hodnoty výrazně ovlivňuje teplota 80 °C. Prepreg se charakterizuje téměř neměnnými hodnotami, které se pohybují okolo 45000 MPa.

### 5.2.2 Pevnost v ohybu

V tabulce (Tabulka 9) jsou vypsány hodnoty pevnosti v ohybu testovaných těles vytvrzených na vzduchu.

Tabulka 9 Hodnoty modulu pevnosti v ohybu těles vytvrzených na vzduchu

Zkoušená série	Průměrná hodnota MPa	Směrodatná odchylka MPa	Zkoušená série	Průměrná hodnota MPa	Směrodatná odchylka MPa
Sklo -30 °C	232	16	Prepreg 50 °C	978	53
Sklo 25 °C	168	49	Prepreg 80 °C	774	60
Sklo 50 °C	49,6	7,6	Uhlík -30 °C	578	75
Sklo 80 °C	26,4	4,6	Uhlík 25 °C	566	27
Prepreg -30 °C	1150	59	Uhlík 50 °C	213	51
Prepreg 25 °C	1020	94	Uhlík 80 °C	54,7	2,9



Obrázek 41 Graf pevnosti v ohybu těles vytvrzených na vzduchu

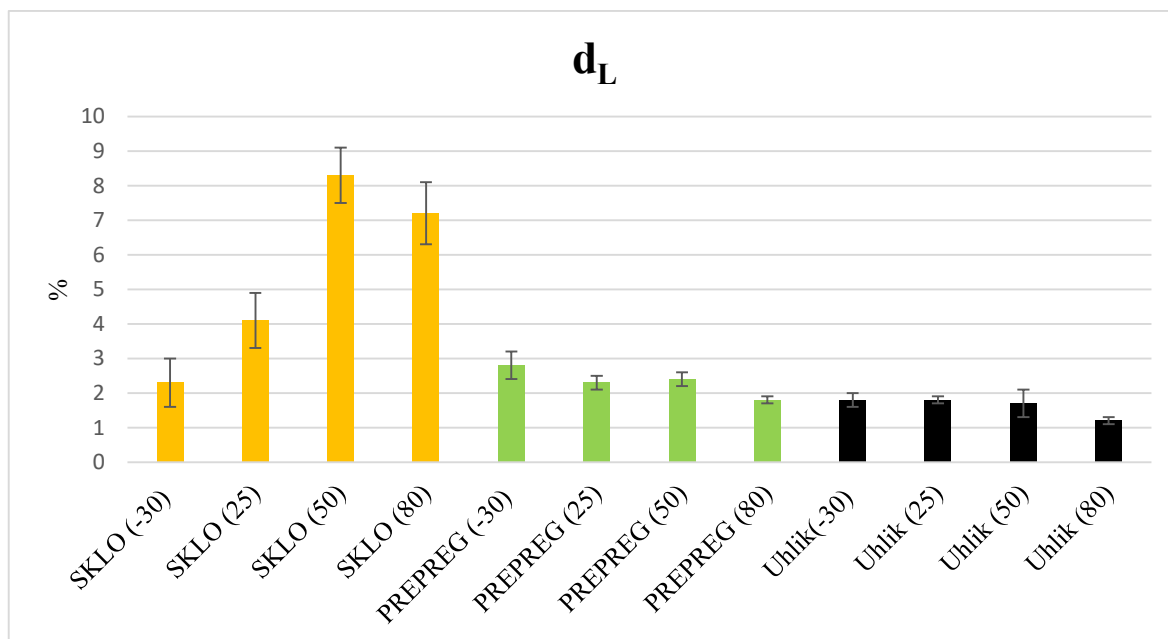
U všech testovaných tělesech s rostoucí teplotou pevnost v ohybu klesá. U skelného a uhlíkového prepregu je pokles u teplot 50 a 80 °C výrazný.

### 5.2.3 Poměrná deformace při mezi pevnosti

V tabulce (Tabulka 10) jsou vypsány hodnoty poměrné deformace při mezi pevnosti testovaných těles vytvrzených na vzduchu.

Tabulka 10 Hodnoty poměrné deformace při mezi pevnosti těles vytvrzených na vzduchu

Zkoušená série	Průměrná hodnota %	Směrodatná odchylka %	Zkoušená série	Průměrná hodnota %	Směrodatná odchylka %
Sklo -30 °C	2,3	0,7	Prepreg 50 °C	2,4	0,2
Sklo 25 °C	4,1	0,8	Prepreg 80 °C	1,8	0,1
Sklo 50 °C	8,3	0,8	Uhlík -30 °C	1,8	0,2
Sklo 80 °C	7,2	0,9	Uhlík 25 °C	1,8	0,1
Prepreg -30 °C	2,8	0,4	Uhlík 50 °C	1,7	0,4
Prepreg 25 °C	2,3	0,2	Uhlík 80 °C	1,2	0,1



Obrázek 42 Graf poměrné deformace při mezi pevnosti těles vytvrzených na vzduchu

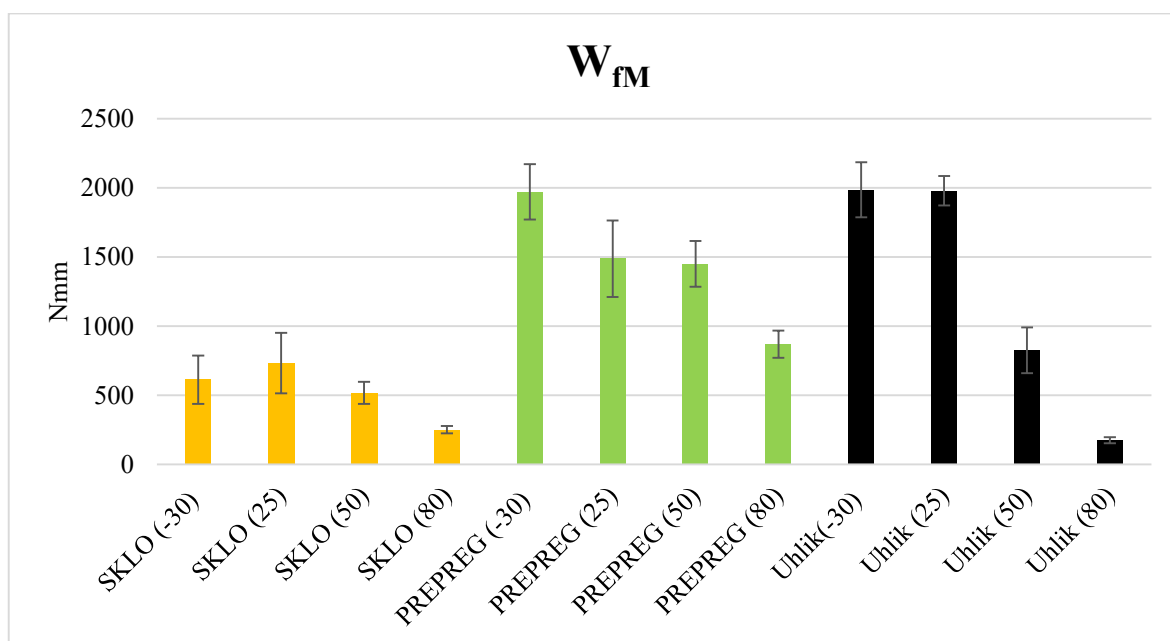
Skelný kompozit vykazuje největší hodnoty, a to převážně u teplot 50 a 80 °C, ty jsou dvojnásobně větší než hodnoty prepregu či uhlíku. U nich dochází k mírnému poklesu při nejvyšší simulované teplotě.

#### 5.2.4 Deformační práce

V tabulce (Tabulka 11) jsou vypsány hodnoty deformační práce testovaných těles vytvrzených na vzduchu.

Tabulka 11 Hodnoty deformační práce těles vytvrzených na vzduchu

Zkoušená série	Průměrná hodnota Nmm	Směrodatná odchylka Nmm	Zkoušená série	Průměrná hodnota Nmm	Směrodatná odchylka Nmm
Sklo -30 °C	612,08	175,49	Prepreg 50 °C	1450,48	165,31
Sklo 25 °C	733,09	218,93	Prepreg 80 °C	868,73	98,11
Sklo 50 °C	516,92	79,22	Uhlík -30 °C	1986,05	198,18
Sklo 80 °C	250,53	27,03	Uhlík 25 °C	1979,03	106,98
Prepreg -30 °C	1971,34	199,89	Uhlík 50 °C	824,97	166,11
Prepreg 25 °C	1487,25	275,65	Uhlík 80 °C	174,29	22,78



Obrázek 43 Graf deformační práce těles vytvrzených na vzduchu

U všech tří materiálů s rostoucí teplotou deformační práce klesá. Opět teplota 80 °C má nejvýraznější pokles. Skelný kompozit má nejmenší hodnoty, a to okolo 500 Nmm.

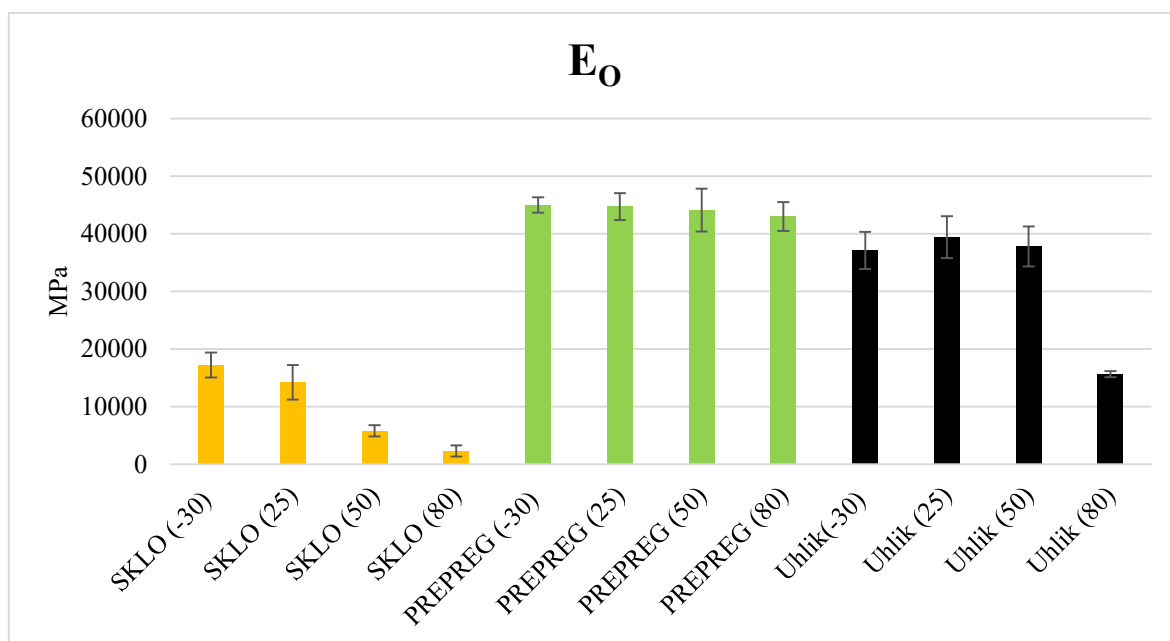
### 5.3 Tělesa vytvrzená v peci

#### 5.3.1 Modul pružnosti v ohybu

V tabulce (Tabulka 12) jsou vypsané hodnoty modulu pružnosti v ohybu testovaných těles vytvrzených v peci.

Tabulka 12 Hodnoty modulu pružnosti v ohybu těles vytvrzených v peci

Zkoušená série	Průměrná hodnota MPa	Směrodatná odchylka MPa	Zkoušená série	Průměrná hodnota MPa	Směrodatná odchylka MPa
Sklo -30 °C	17200	2170	Prepreg 50 °C	44100	3748
Sklo 25 °C	14200	2978	Prepreg 80 °C	43000	2512
Sklo 50 °C	5760	974	Uhlík -30 °C	37100	3208
Sklo 80 °C	2280	976	Uhlík 25 °C	39400	3652
Prepreg -30 °C	45000	1332	Uhlík 50 °C	37800	3473
Prepreg 25 °C	44700	2327	Uhlík 80 °C	15600	532



Obrázek 44 Graf modulu pružnosti v ohybu těles vytvrzených v peci



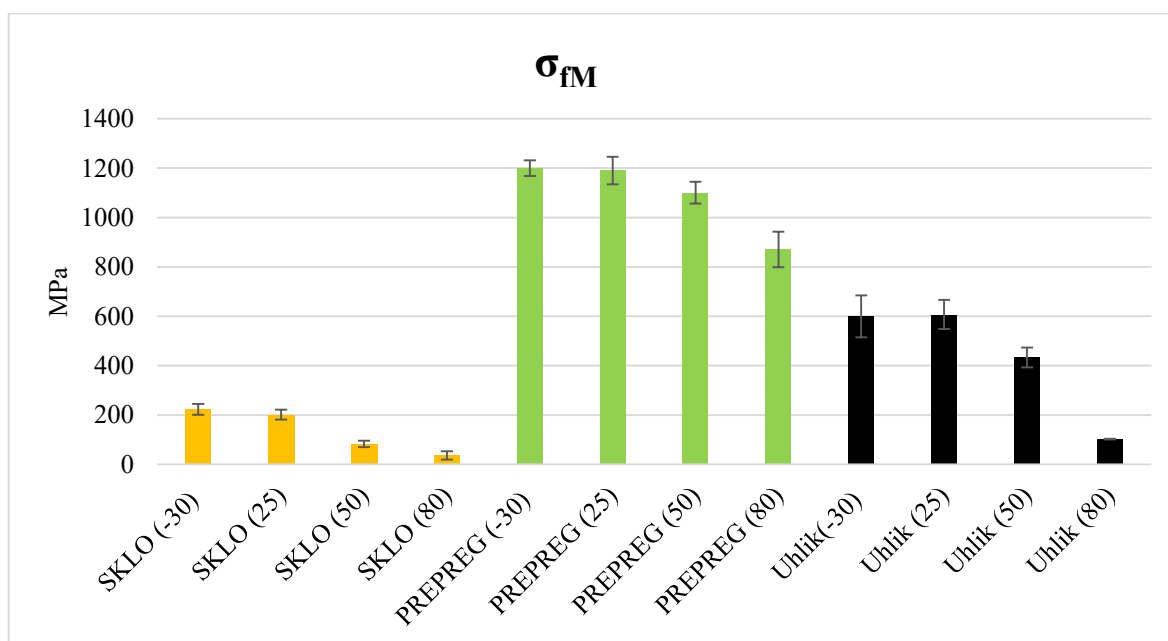
Teplota výrazně ovlivňuje modul pružnosti v ohybu, a to převážně u skelného kompozitu. Též u uhlíkového kompozitu, ovšem zde jen u teploty 80 °C. Prepreg má dobrou tepelnou stálost.

### 5.3.2 Pevnost v ohybu

V tabulce (Tabulka 13) jsou vypsány hodnoty pevnosti v ohybu testovaných těles vytvrzených v peci.

Tabulka 13 Hodnoty pevnosti v ohybu těles vytvrzených v peci

Zkoušená série	Průměrná hodnota MPa	Směrodatná odchylka MPa	Zkoušená série	Průměrná hodnota MPa	Směrodatná odchylka MPa
Sklo -30 °C	223	22	Prepreg 50 °C	1100	44
Sklo 25 °C	201	20	Prepreg 80 °C	871	72
Sklo 50 °C	83,1	13	Uhlík -30 °C	599	85
Sklo 80 °C	36,5	16,9	Uhlík 25 °C	607	59
Prepreg -30 °C	1200	32	Uhlík 50 °C	433	40
Prepreg 25 °C	1190	56	Uhlík 80 °C	102	1,3



Obrázek 45 Graf pevnosti v ohybu těles vytvrzených v peci

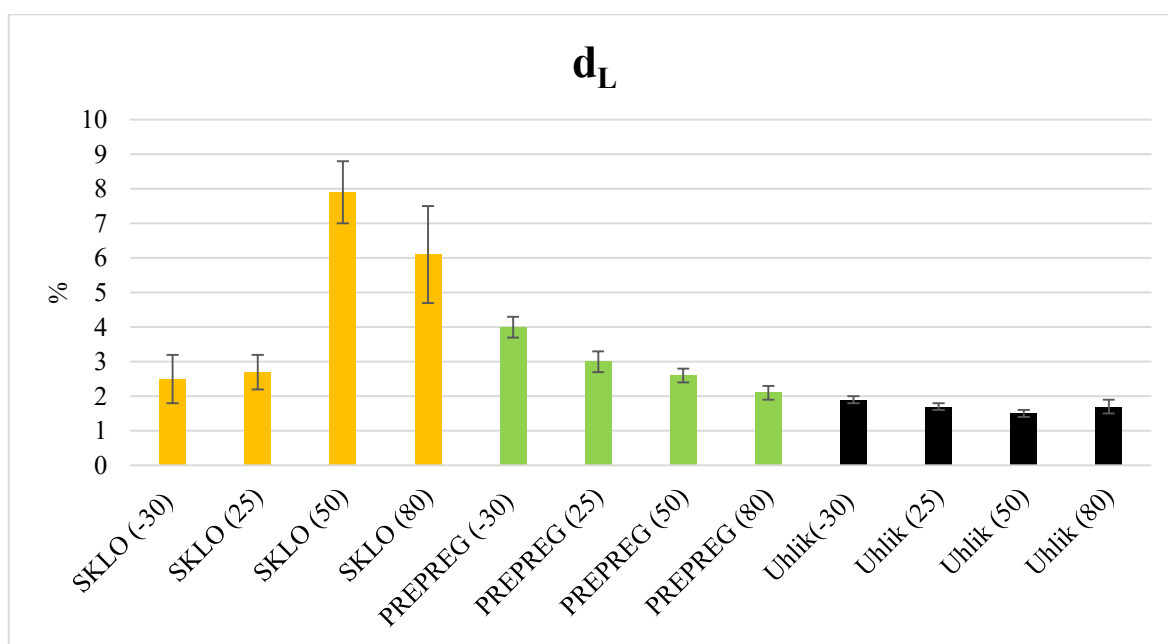
Prepreg vykazuje nejvyšší hodnoty pevnosti v ohybu okolo 1200 MPa. Následuje uhlíkový kompozit, a poté skelný. U všech tří platí, že s narůstající teplotou pevnost v ohybu klesá. U těles z uhlíku testovaných při 80 °C je pokles největší.

### 5.3.3 Poměrná deformace při mezi pevnosti

V tabulce (Tabulka 14) jsou vypsané hodnoty poměrné deformace při mezi pevnosti testovaných těles vytvrzených v peci.

Tabulka 14 Hodnoty poměrné deformace při mezi pevnosti těles vytvrzených v peci

Zkoušená série	Průměrná hodnota %	Směrodatná odchylka %	Zkoušená série	Průměrná hodnota %	Směrodatná odchylka %
Sklo -30 °C	2,5	0,7	Prepreg 50 °C	2,6	0,2
Sklo 25 °C	2,7	0,5	Prepreg 80 °C	2,1	0,2
Sklo 50 °C	7,9	0,9	Uhlík -30 °C	1,9	0,1
Sklo 80 °C	6,1	1,4	Uhlík 25 °C	1,7	0,1
Prepreg -30 °C	4	0,3	Uhlík 50 °C	1,5	0,1
Prepreg 25 °C	3	0,3	Uhlík 80 °C	1,7	0,2



Obrázek 46 Graf poměrné deformace při mezi pevnosti těles vytvrzených v peci

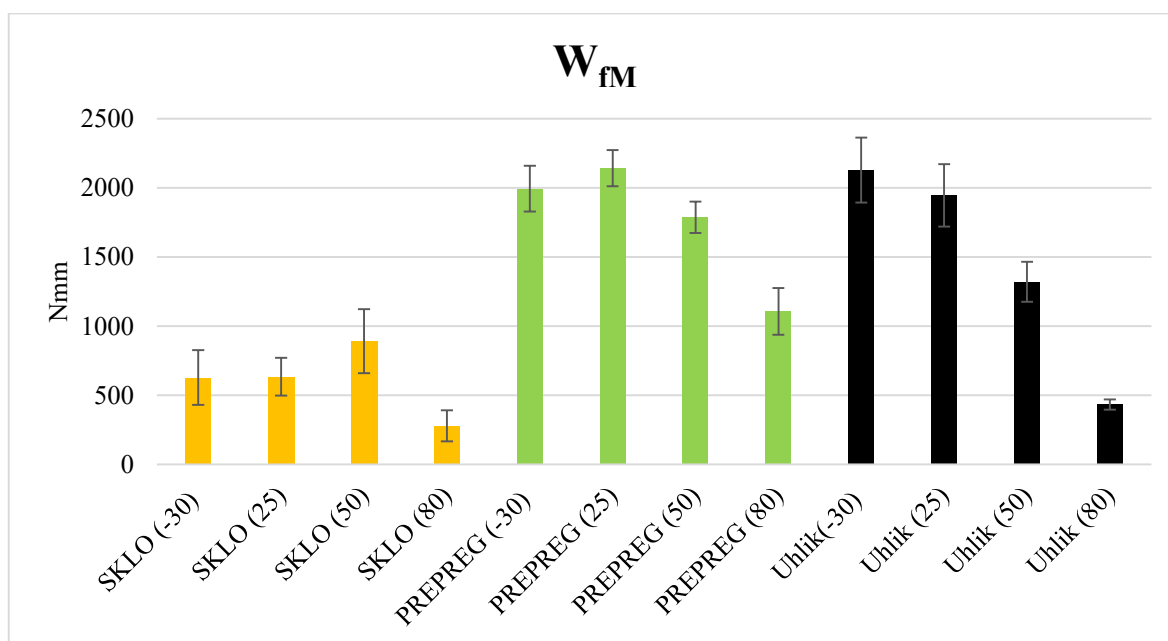
U skelného kompozitu dochází k nárůstu hodnot až od teploty 50 °C, ta je také nejvyšší ze všech. U prepregu s narůstající teplotou dochází k mírnému poklesu hodnot. Uhlíkový kompozit vykazuje téměř totožné hodnoty.

### 5.3.4 Deformační práce

V tabulce (Tabulka 15) jsou vypsány hodnoty deformační práce testovaných těles vytvrzených v peci.

Tabulka 15 Hodnoty deformační práce těles vytvrzených v peci

Zkoušená série	Průměrná hodnota Nmm	Směrodatná odchylka Nmm	Zkoušená série	Průměrná hodnota Nmm	Směrodatná odchylka Nmm
Sklo -30 °C	628,06	197,75	Prepreg 50 °C	1787,75	113,71
Sklo 25 °C	634,89	136,39	Prepreg 80 °C	1106,09	169,71
Sklo 50 °C	891,61	231,76	Uhlík -30 °C	2128,81	234,83
Sklo 80 °C	279,18	112,06	Uhlík 25 °C	1946,13	226,26
Prepreg -30 °C	1993,88	165,82	Uhlík 50 °C	1320,11	145,04
Prepreg 25 °C	2141,85	130,87	Uhlík 80 °C	433,12	36,95



Obrázek 47 Graf deformační práce těles vytvrzených v peci

S rostoucí teplotou hodnoty mají klesající tendenci. Výjimka je u skelného kompozitu, kde při teplotě 50 °C nastal nárůst hodnot. Zde teplota 80 C° opět výrazně ovlivňuje hodnoty deformační práce.

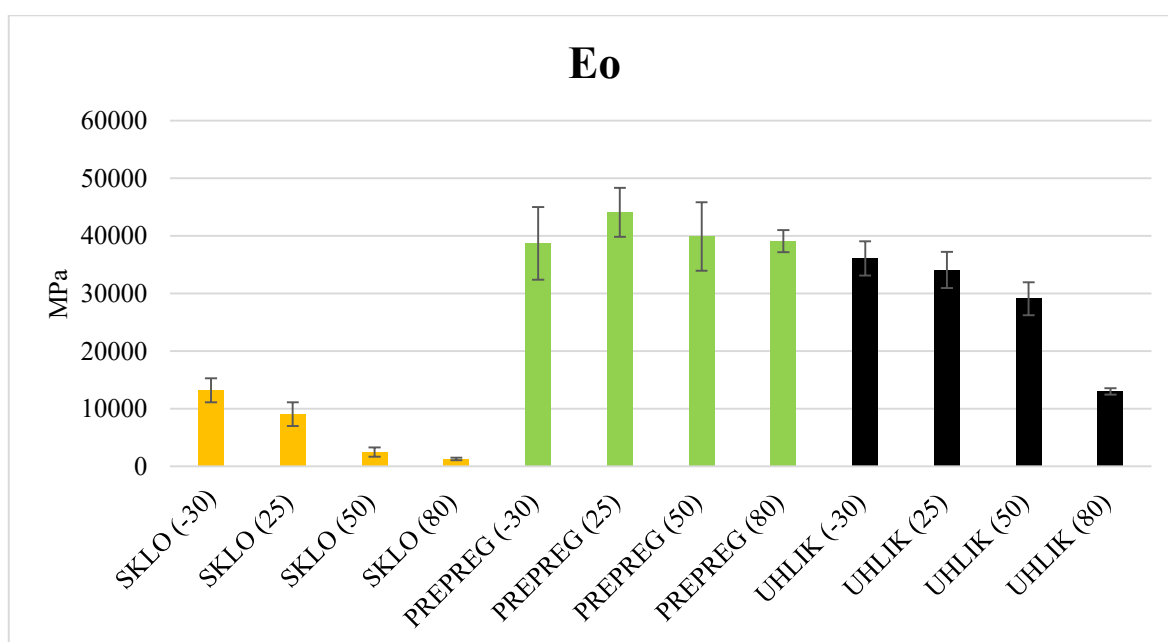
## 5.4 Tělesa vytvrzená v peci a ponořená v H<sub>2</sub>O po dobu 500h

### 5.4.1 Modul pružnosti v ohybu

V tabulce (Tabulka 16) jsou vypsané hodnoty modulu pružnosti v ohybu testovaných těles vytvrzených v peci a vystavených vlhkosti 500 hodin.

Tabulka 16 Hodnoty modulu pružnosti v ohybu těles vytvrzených v peci a ponořených v H<sub>2</sub>O 500h

Zkoušená série	Průměrná hodnota MPa	Směrodatná odchylka MPa	Zkoušená série	Průměrná hodnota MPa	Směrodatná odchylka MPa
Sklo -30 °C	13200	2106	Prepreg 50 °C	39900	5949
Sklo 25 °C	9070	2075	Prepreg 80 °C	39100	1900
Sklo 50 °C	2470	798	Uhlík -30 °C	36100	2977
Sklo 80 °C	1270	226	Uhlík 25 °C	34100	3133
Prepreg -30 °C	38700	6325	Uhlík 50 °C	29100	2869
Prepreg 25 °C	44100	4272	Uhlík 80 °C	13000	543



Obrázek 48 Graf modulu pružnosti v ohybu těles vytvrzených v peci a ponořených v H<sub>2</sub>O 500h

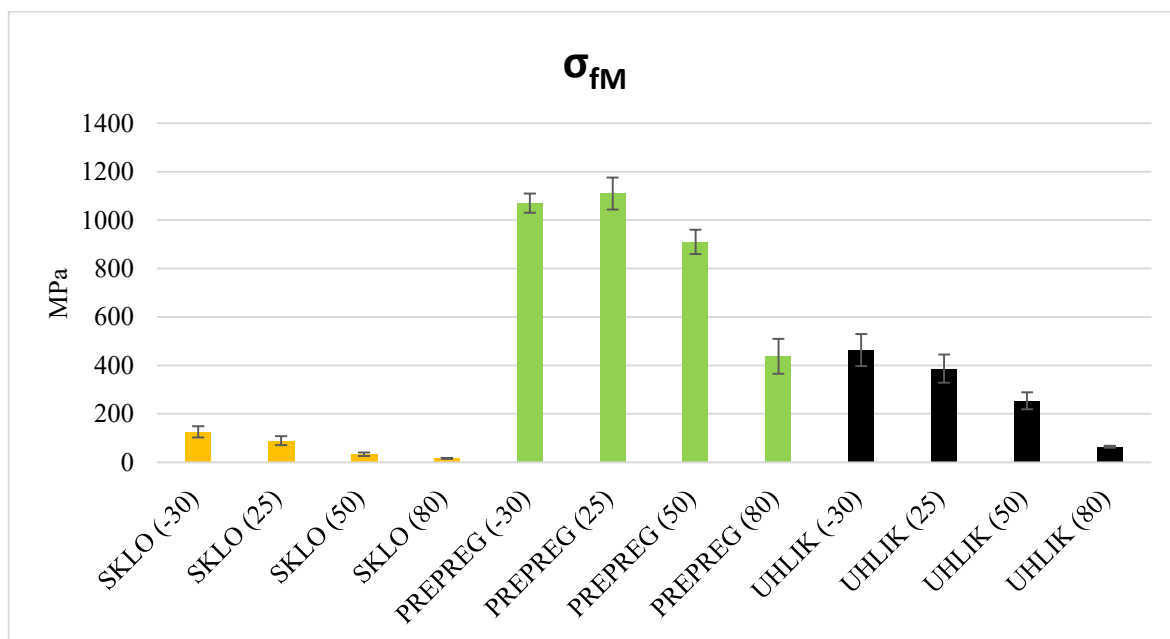
Nejvyšší hodnoty modulu pružnosti v ohybu vykazují tělesa prepregu, následují tělesa uhlíkového kompozitu. Nejnížší hodnoty mají tělesa skelného kompozitu. Se zvyšující se teplotou modul klesá.

#### 5.4.2 Pevnost v ohybu

V tabulce (Tabulka 17) jsou vypsány hodnoty pevnosti v ohybu testovaných těles vytvrzených v peci a vystavených vlhkosti 500 hodin.

Tabulka 17 Hodnoty pevnosti v ohybu těles vytvrzených v peci a ponořených v H<sub>2</sub>O 500h

Zkoušená série	Průměrná hodnota MPa	Směrodatná odchylka MPa	Zkoušená série	Průměrná hodnota MPa	Směrodatná odchylka MPa
Sklo -30 °C	126	23	Prepreg 50 °C	910	50
Sklo 25 °C	89,5	18,5	Prepreg 80 °C	438	72
Sklo 50 °C	33,5	7,4	Uhlík -30 °C	464	66
Sklo 80 °C	16,3	2,1	Uhlík 25 °C	387	58
Prepreg -30 °C	1070	40	Uhlík 50 °C	254	35
Prepreg 25 °C	1110	66	Uhlík 80 °C	64,9	4,1



Obrázek 49 Graf pevnosti v ohybu těles vytvrzených v peci a ponořených v H<sub>2</sub>O 500h

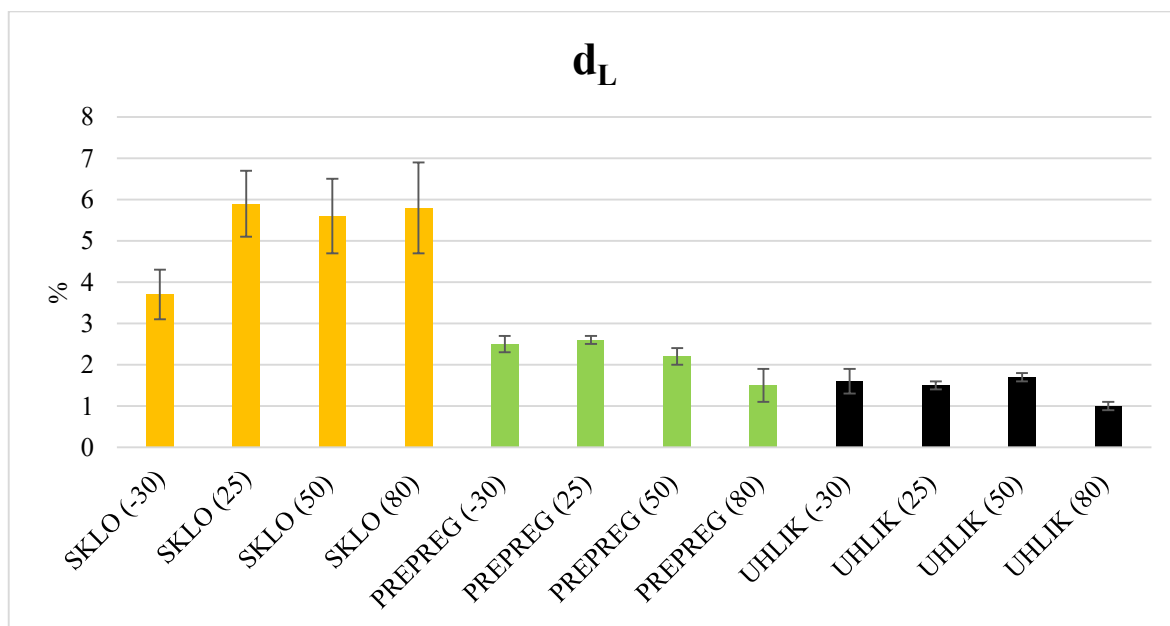
Je patrné, že teplota hraje významnou roli u skelných kompozitů, které vykazují nejvyšší hodnoty pevnosti v ohybu. Nejvyšší hodnoty má prepreg, ty jsou oproti uhlíku dvojnásobné.

### 5.4.3 Poměrná deformace při mezi pevnosti

V tabulce (Tabulka 18) jsou vypsané hodnoty poměrné deformace při mezi pevnosti testovaných těles vytvrzených v peci a vystavených vlhkosti 500 hodin.

Tabulka 18 Hodnoty poměrné deformace při mezi pevnosti těles vytvrzených v peci a ponořených v H<sub>2</sub>O 500h

Zkoušená série	Průměrná hodnota %	Směrodatná odchylka %	Zkoušená série	Průměrná hodnota %	Směrodatná odchylka %
Sklo -30 °C	3,7	0,6	Prepreg 50 °C	2,2	0,2
Sklo 25 °C	5,9	0,8	Prepreg 80 °C	1,5	0,4
Sklo 50 °C	5,6	0,9	Uhlík -30 °C	1,6	0,3
Sklo 80 °C	5,8	1,1	Uhlík 25 °C	1,5	0,1
Prepreg -30 °C	2,5	0,2	Uhlík 50 °C	1,7	0,1
Prepreg 25 °C	2,6	0,1	Uhlík 80 °C	1	0,1



Obrázek 50 Graf poměrné deformace při mezi pevnosti těles vytvrzených v peci a ponořených v H<sub>2</sub>O 500h

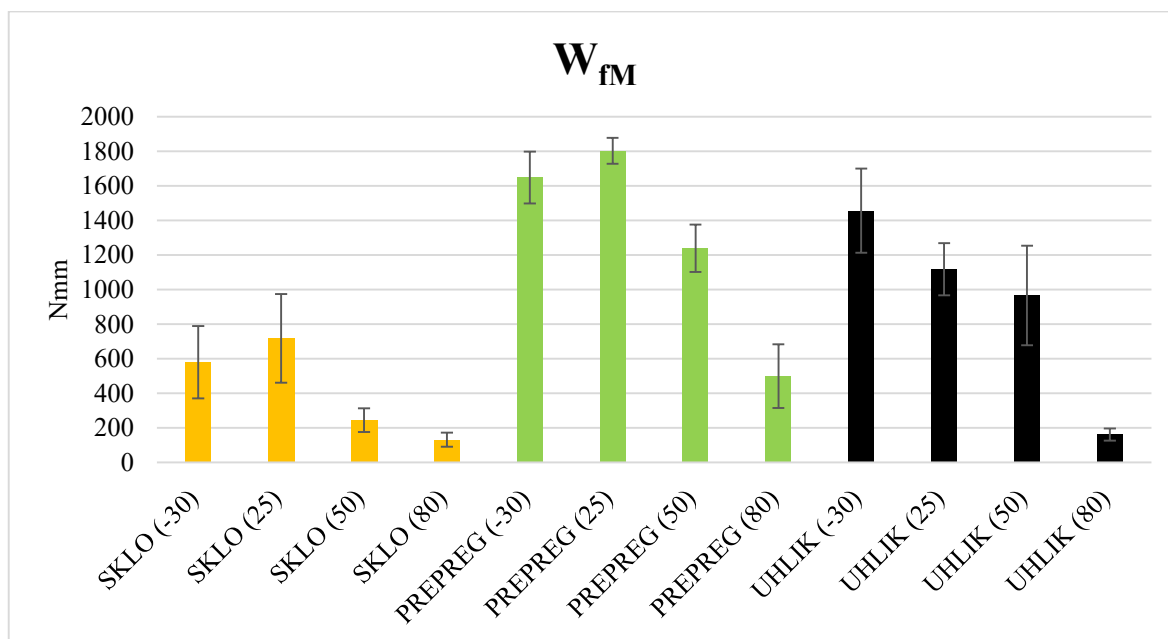
Největší deformaci mají skelné kompozity, hodnoty se pohybují kolem 6%. Hodnoty prepregu jsou téměř dvojnásobně menší. Výsledky uhlíkového kompozitu jsou nepatrně nižší než prepregu.

#### 5.4.4 Deformační práce

V tabulce (Tabulka 19) jsou vypsány hodnoty deformační práce testovaných těles vytvrzených v peci a vystavených vlhkosti 500 hodin.

Tabulka 19 Hodnoty deformační práce těles vytvrzených v peci a ponořených v H<sub>2</sub>O 500h

Zkoušená série	Průměrná hodnota Nmm	Směrodatná odchylka Nmm	Zkoušená série	Průměrná hodnota Nmm	Směrodatná odchylka Nmm
Sklo -30 °C	580,13	209,15	Prepreg 50 °C	1238,24	136,97
Sklo 25 °C	717,19	256,34	Prepreg 80 °C	498,19	184,37
Sklo 50 °C	244,12	67,96	Uhlík -30 °C	1456,02	243,84
Sklo 80 °C	131,52	40,61	Uhlík 25 °C	1117,67	150,36
Prepreg -30 °C	1648,15	150,23	Uhlík 50 °C	965,67	287,36
Prepreg 25 °C	1802,46	74,74	Uhlík 80 °C	160,8	35,6



Obrázek 51 Graf deformační práce těles vytvrzených v peci a ponořených v H<sub>2</sub>O 500h



Největší práci bylo zapotřebí vynaložit u prepregů a uhlíkových kompozitů. Hodnoty práce výrazně klesají při teplotě 80 °C. Skelný kompozit je opět na posledním místě s hodnotami okolo 600 Nmm.

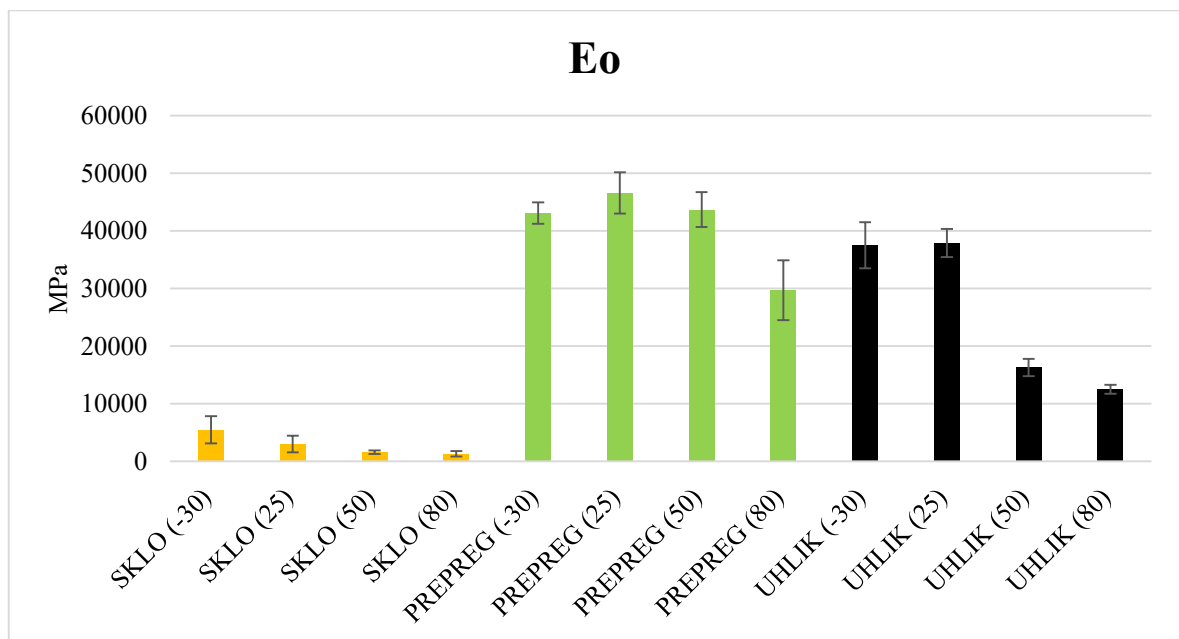
## 5.5 Tělesa vytvrzená na vzduchu a ponořená v H<sub>2</sub>O po dobu 500h

### 5.5.1 Modu pružnosti v ohybu

V tabulce (Tabulka 20) jsou vypsané hodnoty modulu pružnosti v ohybu testovaných těles vytvrzených na vzduchu a vystavených vlhkosti 500 hodin.

Tabulka 20 Hodnoty modulu pružnosti v ohybu těles vytvrzených na vzduchu a ponořených v H<sub>2</sub>O 500h

Zkoušená série	Průměrná hodnota MPa	Směrodatná odchylka MPa	Zkoušená série	Průměrná hodnota MPa	Směrodatná odchylka MPa
Sklo -30 °C	5470	2367	Prepreg 50 °C	43700	3037
Sklo 25 °C	3000	1438	Prepreg 80 °C	29700	5197
Sklo 50 °C	1600	302	Uhlík -30 °C	37500	4003
Sklo 80 °C	1300	457	Uhlík 25 °C	37900	2439
Prepreg -30 °C	43100	1861	Uhlík 50 °C	16300	1490
Prepreg 25 °C	46600	3599	Uhlík 80 °C	12500	761



Obrázek 52 Graf modulu pružnosti v ohybu těles vytvrzených na vzduchu a ponořených v H<sub>2</sub>O 500h

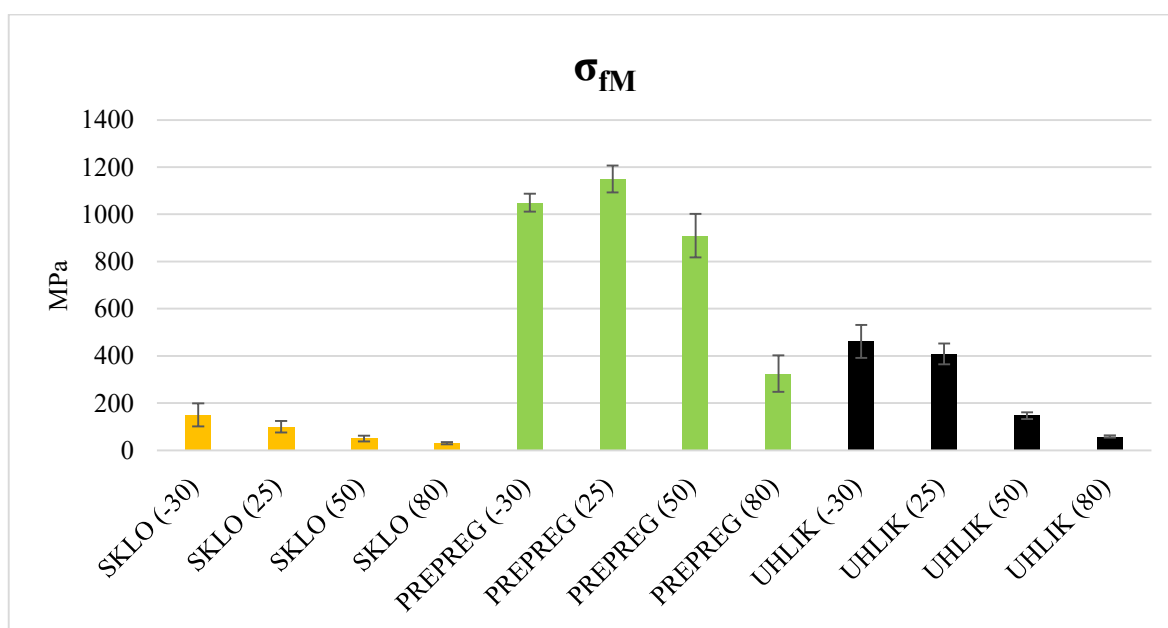
Prepreg s hodnotami okolo 40000 MPa má největší modul pružnosti v ohybu. O nepatrné snížení hodnot je na druhém místě uhlíkový kompozit. Modul skelného kompozitu je několikanásobně nižší.

### 5.5.2 Pevnost v ohybu

V tabulce (Tabulka 21) jsou vypsány hodnoty pevnosti v ohybu testovaných těles vytvrzených na vzduchu a vystavených vlhkosti 500 hodin.

Tabulka 21 Hodnoty pevnosti v ohybu těles vytvrzených na vzduchu a ponořených v H<sub>2</sub>O 500h

Zkoušená série	Průměrná hodnota MPa	Směrodatná odchylka MPa	Zkoušená série	Průměrná hodnota MPa	Směrodatná odchylka MPa
Sklo -30 °C	150	49	Prepreg 50 °C	910	92
Sklo 25 °C	100	24	Prepreg 80 °C	325	77
Sklo 50 °C	50	12	Uhlík -30 °C	462	70
Sklo 80 °C	30	5	Uhlík 25 °C	409	44
Prepreg -30 °C	1050	38	Uhlík 50 °C	147	14
Prepreg 25 °C	1150	57	Uhlík 80 °C	58,4	4,5



Obrázek 53 Graf pevnosti v ohybu těles vytvrzených na vzduchu a ponořených v H<sub>2</sub>O 500h

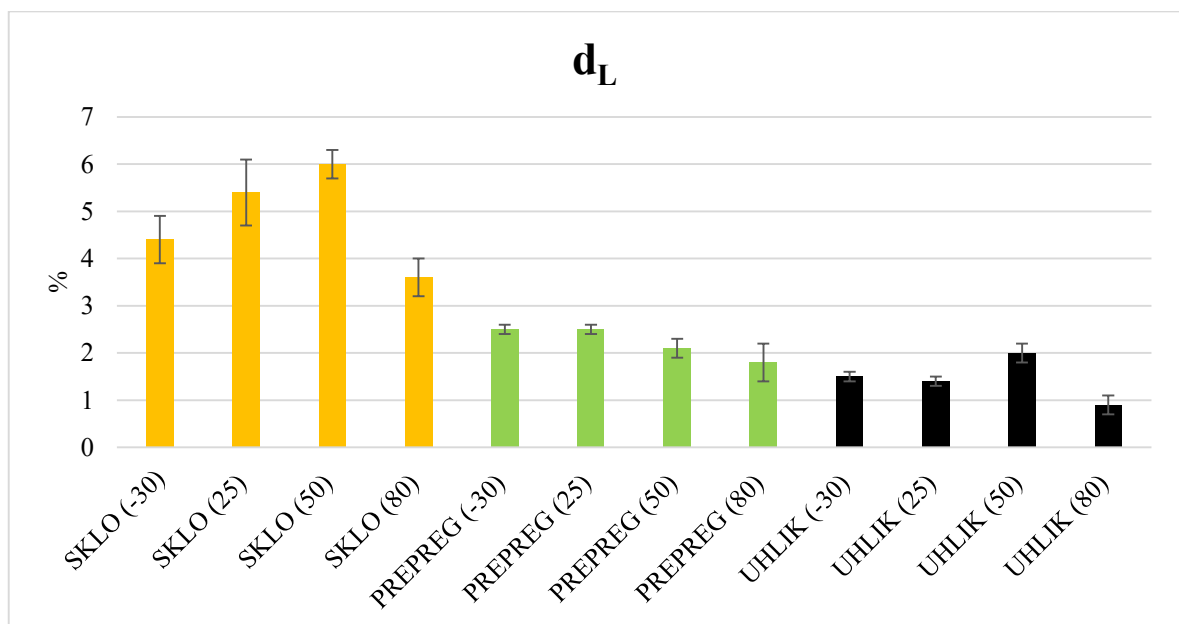
Hodnoty pevnosti v ohybu prepregu jsou dvojnásobně vyšší než hodnoty uhlíku. Skelný kompozit je výrazně nižší než oba zmíněné vzorky. Opět výsledky při teplotě 80 °C jsou výrazně nižší.

### 5.5.3 Poměrná deformace při mezi pevnosti

V tabulce (Tabulka 22) jsou vypsané hodnoty poměrné deformace při mezi pevnosti testovaných těles vytvrzených na vzduchu a vystavených vlhkosti 500 hodin.

Tabulka 22 Hodnoty poměrné deformace při mezi pevnosti těles vytvrzených na vzduchu a ponořených v H<sub>2</sub>O 500h

Zkoušená série	Průměrná hodnota %	Směrodatná odchylka %	Zkoušená série	Průměrná hodnota %	Směrodatná odchylka %
Sklo -30 °C	4,4	0,5	Prepreg 50 °C	2,1	0,2
Sklo 25 °C	5,4	0,7	Prepreg 80 °C	1,8	0,6
Sklo 50 °C	6	0,3	Uhlík -30 °C	1,5	0,1
Sklo 80 °C	3,6	0,4	Uhlík 25 °C	1,4	0,1
Prepreg -30 °C	2,5	0,1	Uhlík 50 °C	2	0,2
Prepreg 25 °C	2,5	0,1	Uhlík 80 °C	0,9	0,2



Obrázek 54 Graf poměrné deformace při mezi pevnosti těles vytvrzených na vzduchu a ponořených v H<sub>2</sub>O 500h

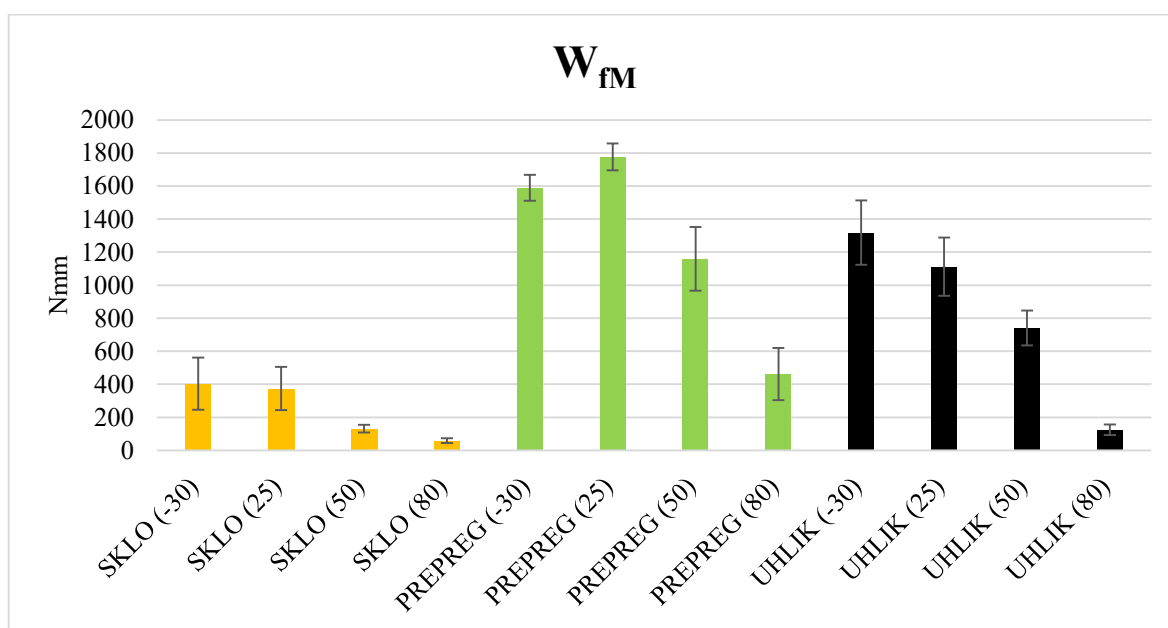
Skelný kompozit vykazuje největší hodnoty prodloužení. Při srovnání prepregu a uhlíku můžeme říci, že hodnoty jsou nepatrně odlišné. U skelného kompozitu prodloužení stoupá se zvyšující se teplotou, vyjma teploty 80 °C. U prepregu a uhlíku je tomu naopak.

#### 5.5.4 Deformační práce

V tabulce (Tabulka 23) jsou vypsány hodnoty deformační práce testovaných těles vytvrzených na vzduchu a vystavených vlhkosti 500 hodin.

Tabulka 23 Hodnoty deformační práce těles vytvrzených na vzduchu a ponořených v H<sub>2</sub>O 500h

Zkoušená série	Průměrná hodnota Nmm	Směrodatná odchylka Nmm	Zkoušená série	Průměrná hodnota Nmm	Směrodatná odchylka Nmm
Sklo -30 °C	403,49	157,68	Prepreg 50 °C	1158,9	193,4
Sklo 25 °C	374,45	131,27	Prepreg 80 °C	462,28	157,57
Sklo 50 °C	131,35	24,18	Uhlík -30 °C	1317,52	194,89
Sklo 80 °C	58,05	14,57	Uhlík 25 °C	1111,81	177,17
Prepreg -30 °C	1589,85	78,51	Uhlík 50 °C	740,79	104,74
Prepreg 25 °C	1776,37	80,81	Uhlík 80 °C	124,98	32,12



Obrázek 55 Graf deformační práce těles vytvrzených na vzduchu a ponořených v H<sub>2</sub>O 500h

Deformační práci s hodnotami okolo 1500 Nmm bylo zapotřebí vynaložit u prepregu. Následuje uhlíkový kompozit. S hodnotami okolo 500 Nmm je skelný kompozit na posledním místě.

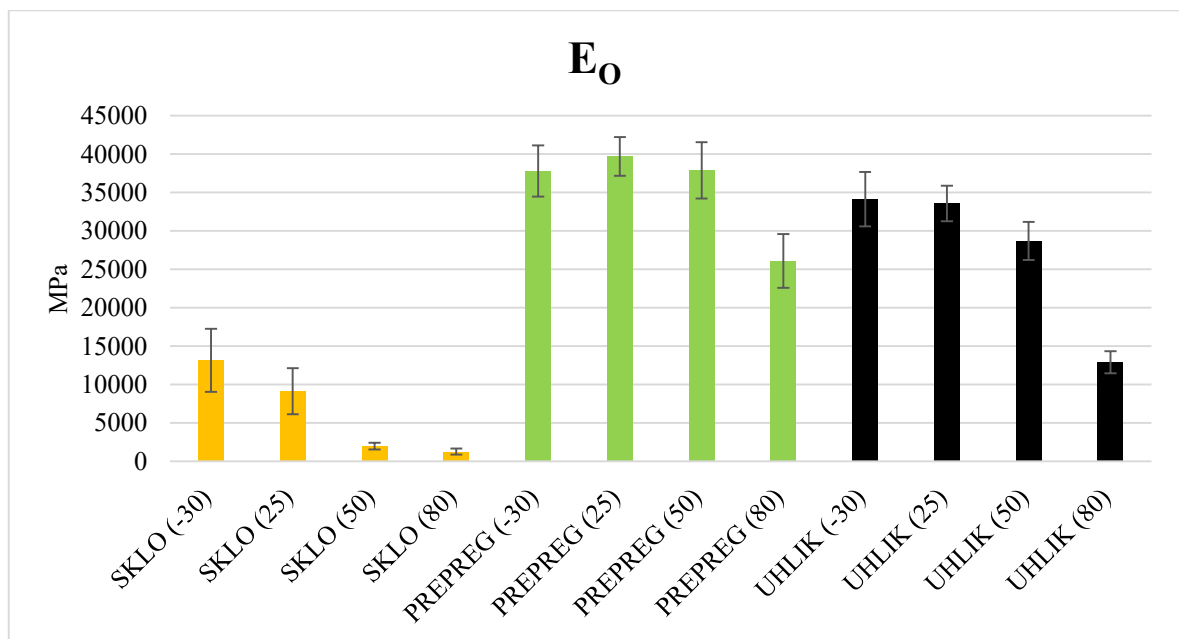
## 5.6 Tělesa vytvrzená v peci a ponořená v H<sub>2</sub>O po dobu 1000h

### 5.6.1 Modul pružnosti v ohybu

V tabulce (Tabulka 24) jsou vypsané hodnoty modulu pružnosti v ohybu testovaných těles vytvrzených v peci a vystavených vlhkosti 1000 hodin.

Tabulka 24 Hodnoty modulu pružnosti v ohybu těles vytvrzených v peci a ponořených v H<sub>2</sub>O 1000h

Zkoušená série	Průměrná hodnota MPa	Směrodatná odchylka MPa	Zkoušená série	Průměrná hodnota MPa	Směrodatná odchylka MPa
Sklo -30 °C	13144	4109	Prepreg 50 °C	37900	3660
Sklo 25 °C	9130	3013	Prepreg 80 °C	26100	3497
Sklo 50 °C	1980	452	Uhlík -30 °C	34133	3544
Sklo 80 °C	1260	395	Uhlík 25 °C	33571	2327
Prepreg -30 °C	37800	3341	Uhlík 50 °C	28700	2467
Prepreg 25 °C	39700	2541	Uhlík 80 °C	12900	1432



Obrázek 56 Graf modulu pružnosti v ohybu těles vytvrzených v peci a ponořených v H<sub>2</sub>O 1000h

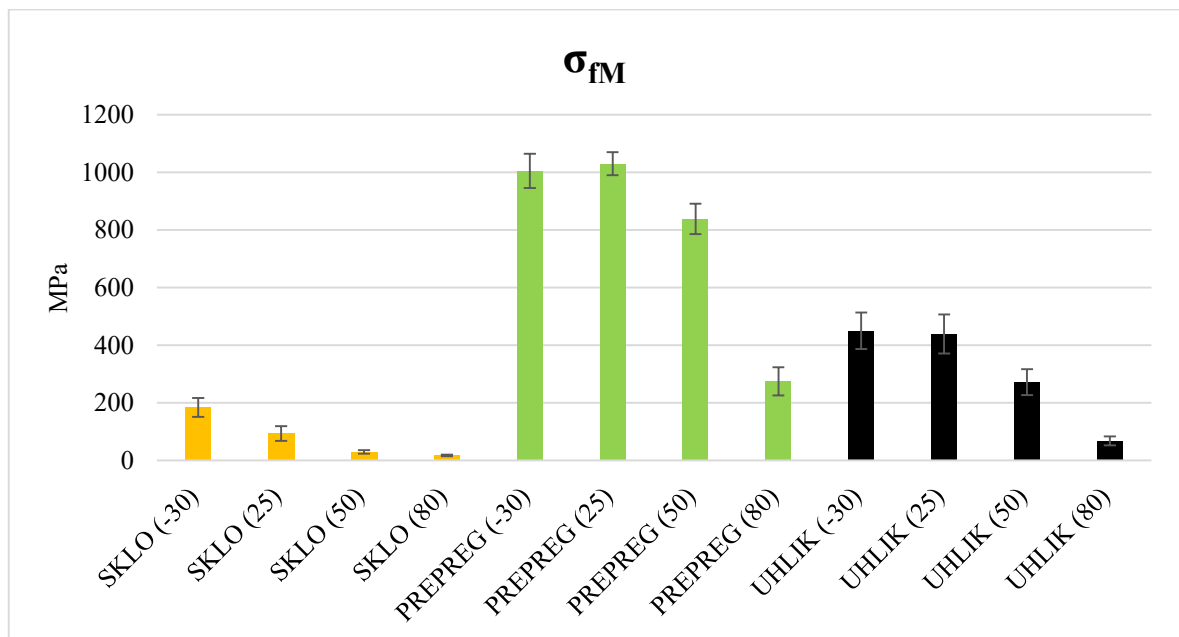
Teplota výrazně mění modul pružnosti u všech tří vzorků. S jejím nárůstem modul klesá, a to převážně u teploty 80 °C. Nejvyšší modul s hodnotami okolo 35000 MPa vykazuje prepreg, následuje uhlíkový kompozit a na třetím místě je skelný kompozit.

### 5.6.2 Pevnost v ohybu

V tabulce (Tabulka 25) jsou vypsány hodnoty pevnosti v ohybu testovaných těles vytvrzených v peci a vystavených vlhkosti 1000 hodin.

Tabulka 25 Hodnoty pevnosti v ohybu těles vytvrzených v peci a ponořených v H<sub>2</sub>O 1000h

Zkoušená série	Průměrná hodnota MPa	Směrodatná odchylka MPa	Zkoušená série	Průměrná hodnota MPa	Směrodatná odchylka MPa
Sklo -30 °C	184	33	Prepreg 50 °C	838	53
Sklo 25 °C	92,9	25,6	Prepreg 80 °C	274	48
Sklo 50 °C	29,2	5,7	Uhlík -30 °C	450	63
Sklo 80 °C	17,1	2,8	Uhlík 25 °C	439	68
Prepreg -30 °C	1005	59	Uhlík 50 °C	271	45
Prepreg 25 °C	1030	40	Uhlík 80 °C	67,1	15,6



Obrázek 57 Graf pevnosti v ohybu těles vytvrzených v peci a ponořených v H<sub>2</sub>O 1000h



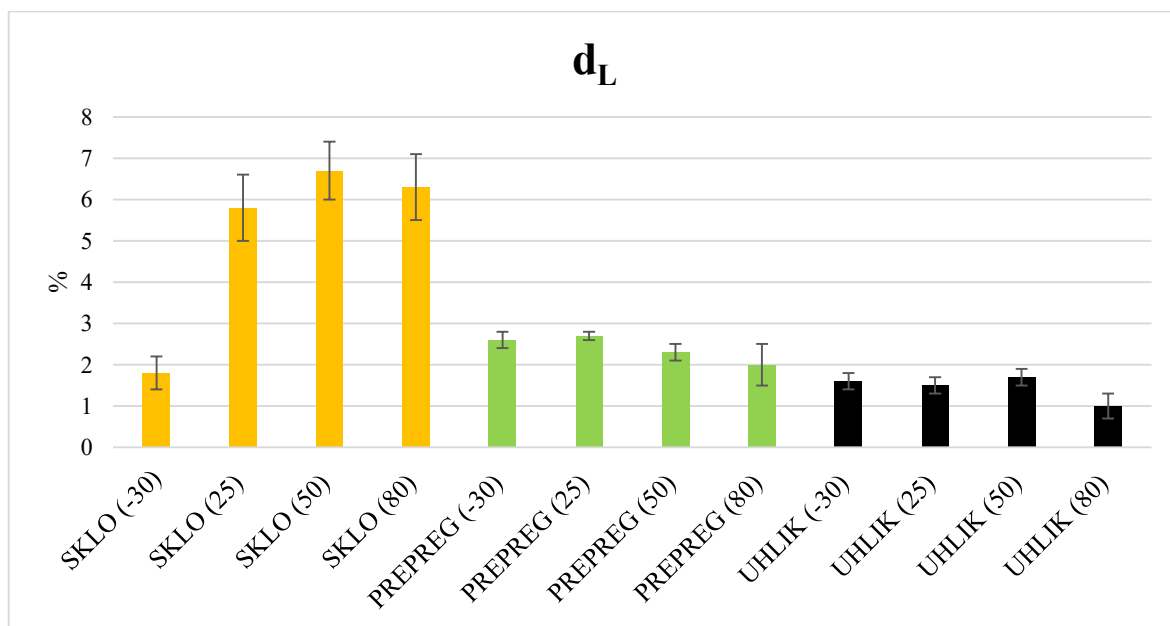
Hodnoty pevnosti v ohybu u prepregu jsou téměř dvojnásobně vyšší než hodnoty uhlíkového kompozitu. Skelný kompozit je oproti uhlíkovému dvojnásobně menší, a to s hodnotami okolo 100 MPa.

### 5.6.3 Poměrná deformace při mezi pevnosti

V tabulce (Tabulka 26) jsou vypsané hodnoty poměrné deformace při mezi pevnosti testovaných těles vytvrzených v peci a vystavených vlhkosti 1000 hodin.

Tabulka 26 Hodnoty poměrné deformace při mezi pevnosti těles vytvrzených v peci a ponořených v H<sub>2</sub>O 1000h

Zkoušená série	Průměrná hodnota %	Směrodatná odchylka %	Zkoušená série	Průměrná hodnota %	Směrodatná odchylka %
Sklo -30 °C	1,8	0,4	Prepreg 50 °C	2,3	0,2
Sklo 25 °C	5,8	0,8	Prepreg 80 °C	2	0,5
Sklo 50 °C	6,7	0,7	Uhlík -30 °C	1,6	0,1
Sklo 80 °C	6,3	0,8	Uhlík 25 °C	1,5	0,2
Prepreg -30 °C	2,6	0,2	Uhlík 50 °C	1,7	0,2
Prepreg 25 °C	2,7	0,1	Uhlík 80 °C	1	0,3



Obrázek 58 Graf poměrné deformace při mezi pevnosti těles vytvrzených v peci a ponořených v H<sub>2</sub>O 1000h

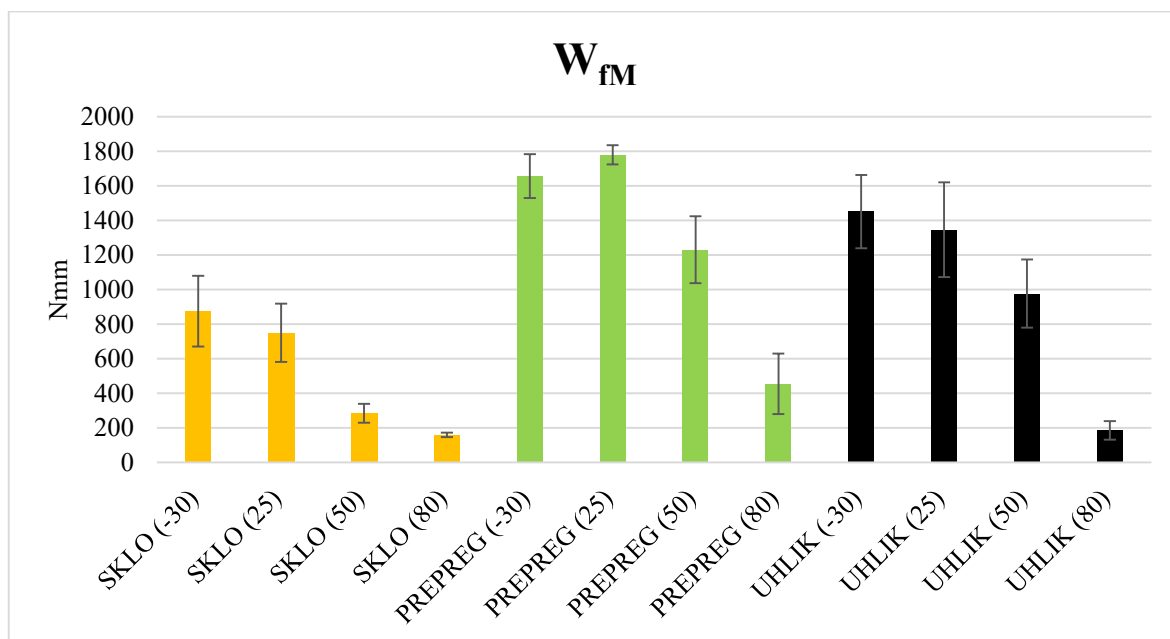
U poměrné deformace má nejvyšší hodnoty opět skelný kompozit. Prepreg a uhlíkový kompozit má hodnoty dvojnásobně menší a v porovnání mezi sebou mají téměř totožné hodnoty.

#### 5.6.4 Deformační práce

V tabulce (Tabulka 27) jsou vypsány hodnoty deformační práce testovaných těles vytvrzených v peci a vystavených vlhkosti 1000 hodin.

Tabulka 27 Hodnoty deformační práce těles vytvrzených v peci a ponořených v H<sub>2</sub>O 1000h

Zkoušená série	Průměrná hodnota Nmm	Směrodatná odchylka Nmm	Zkoušená série	Průměrná hodnota Nmm	Směrodatná odchylka Nmm
Sklo -30 °C	875	205	Prepreg 50 °C	1230,33	194,32
Sklo 25 °C	749,6	168,3	Prepreg 80 °C	454,15	175,34
Sklo 50 °C	284,1	54,8	Uhlík -30 °C	1451,48	212,02
Sklo 80 °C	159,51	12,81	Uhlík 25 °C	1345,96	274,36
Prepreg -30 °C	1657,18	126,72	Uhlík 50 °C	976,57	197,52
Prepreg 25 °C	1779,98	56,13	Uhlík 80 °C	184,93	52,97



Obrázek 59 Graf deformační práce těles vytvrzených v peci a ponořených v H<sub>2</sub>O 1000h

Teplota výrazně zasahuje do deformační práce. Z grafu je čitelné, že při teplotě 80 °C dochází k výraznému poklesu hodnot. Prepreg vykazuje nejvyšší hodnotu při teplotě 25 °C, čím se liší od obou testovaných vzorků.

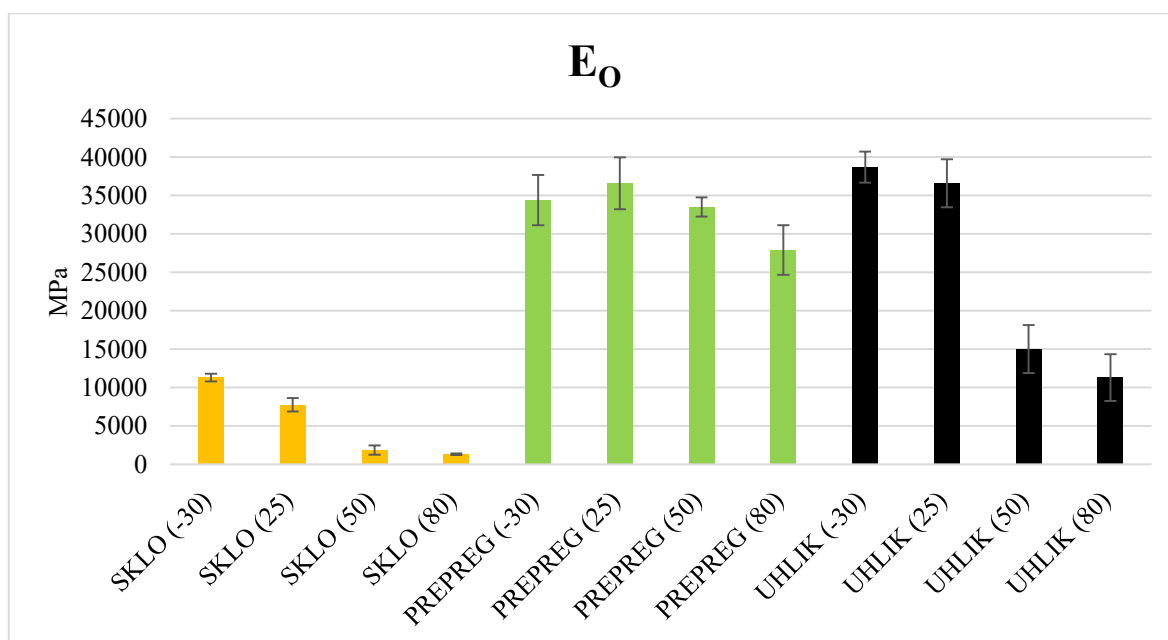
## 5.7 Tělesa vytvrzená na vzduchu a ponořená v H<sub>2</sub>O po dobu 1000h

### 5.7.1 Modul pružnosti v ohybu

V tabulce (Tabulka 28) jsou vypsané hodnoty modulu pružnosti v ohybu testovaných těles vytvrzených na vzduchu a vystavených vlhkosti 1000 hodin.

Tabulka 28 Hodnoty modulu pružnosti v ohybu těles vytvrzených na vzduchu a ponořených v H<sub>2</sub>O 1000h

Zkoušená série	Průměrná hodnota MPa	Směrodatná odchylka MPa	Zkoušená série	Průměrná hodnota MPa	Směrodatná odchylka MPa
Sklo -30 °C	11300	509	Prepreg 50 °C	33500	1260
Sklo 25 °C	7760	864	Prepreg 80 °C	27900	3243
Sklo 50 °C	1860	622	Uhlík -30 °C	38700	2010
Sklo 80 °C	1300	104	Uhlík 25 °C	36600	3112
Prepreg -30 °C	34400	3270	Uhlík 50 °C	15000	3120
Prepreg 25 °C	36600	3370	Uhlík 80 °C	11300	3027



Obrázek 60 Graf modulu pružnosti v ohybu těles vytvrzených na vzduchu a ponořených v H<sub>2</sub>O 1000h

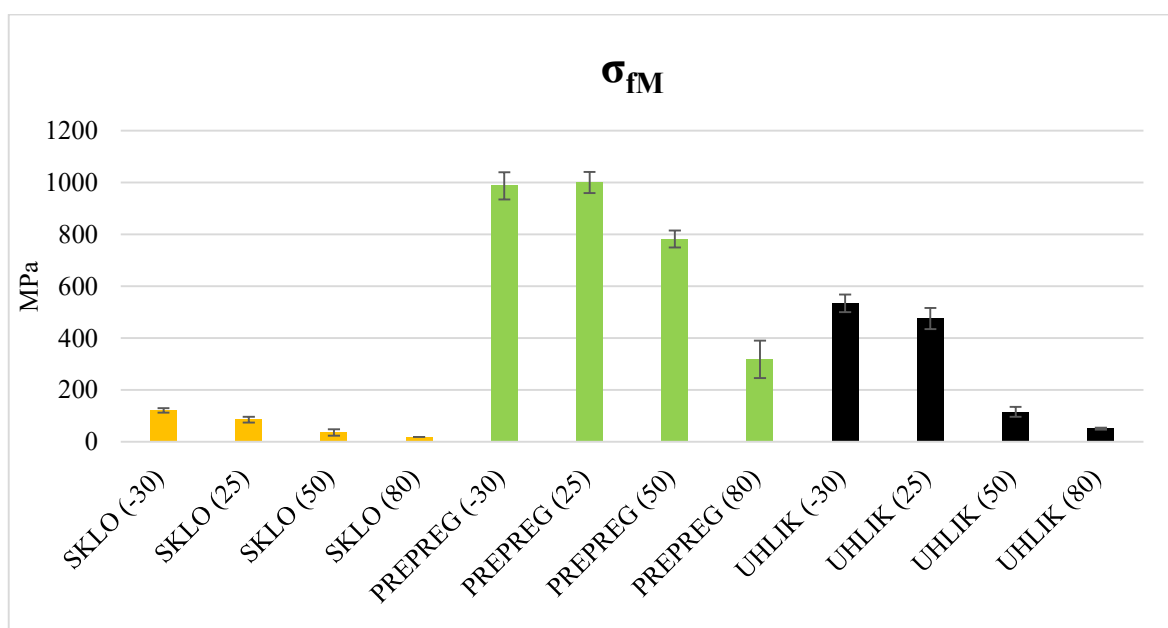
Hodnoty prepregu a uhlíku při teplotách -30 a 25 °C jsou téměř totožné. Prepreg se vyznačuje vyššími hodnotami u zbylých dvou teplot oproti uhlíku. Skelný kompozit vykazuje nejnižší hodnoty modulu pružnosti.

### 5.7.2 Pevnost v ohybu

V tabulce (Tabulka 29) jsou vypsány hodnoty pevnosti v ohybu testovaných těles vytvrzených na vzduchu a vystavených vlhkosti 1000 hodin.

Tabulka 29 Hodnoty pevnosti v ohybu těles vytvrzených na vzduchu a ponořených v H<sub>2</sub>O 1000h

Zkoušená série	Průměrná hodnota MPa	Směrodatná odchylka MPa	Zkoušená série	Průměrná hodnota MPa	Směrodatná odchylka MPa
Sklo -30 °C	121	9	Prepreg 50 °C	782	33
Sklo 25 °C	85,3	11,5	Prepreg 80 °C	318	72
Sklo 50 °C	35,7	12,8	Uhlík -30 °C	534	34
Sklo 80 °C	18,5	0,5	Uhlík 25 °C	475	41
Prepreg -30 °C	987	52	Uhlík 50 °C	115	19
Prepreg 25 °C	1000	41	Uhlík 80 °C	49,9	3,7



Obrázek 61 Graf pevnosti v ohybu těles vytvrzených na vzduchu a ponořených v H<sub>2</sub>O 1000h

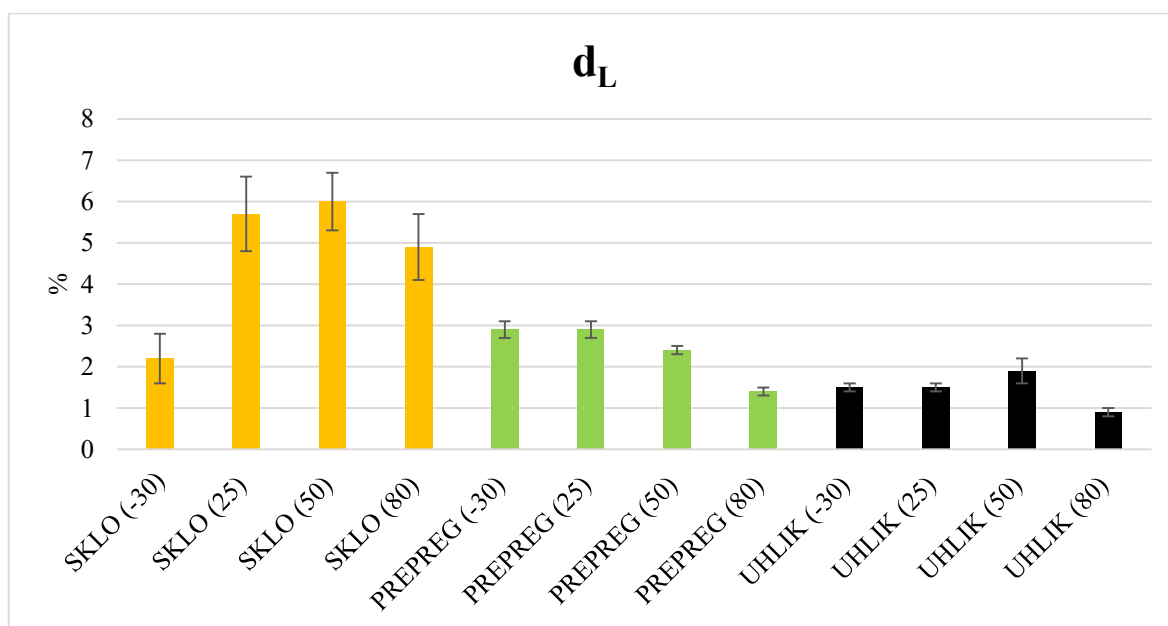
Pevnost v ohybu má nejvyšší prepreg, a to oproti uhlíku dvojnásobnou, při teplotě 80 °C je tato hodnota trojnásobná. Hodnoty skelného kompozitu jsou výrazně nekolinásobně nižší.

### 5.7.3 Poměrná deformace při mezi pevnosti

V tabulce (Tabulka 30) jsou vypsané hodnoty poměrné deformace při mezi pevnosti testovaných těles vytvrzených na vzduchu a vystavených vlhkosti 1000 hodin.

Tabulka 30 Hodnoty poměrné deformace při mezi pevnosti těles vytvrzených na vzduchu a ponořených v H<sub>2</sub>O 1000h

Zkoušená série	Průměrná hodnota %	Směrodatná odchylka %	Zkoušená série	Průměrná hodnota %	Směrodatná odchylka %
Sklo -30 °C	2,2	0,6	Prepreg 50 °C	2,4	0,1
Sklo 25 °C	5,7	0,9	Prepreg 80 °C	1,4	0,1
Sklo 50 °C	6	0,7	Uhlík -30 °C	1,5	0,1
Sklo 80 °C	4,9	0,8	Uhlík 25 °C	1,5	0,1
Prepreg -30 °C	2,9	0,2	Uhlík 50 °C	1,9	0,3
Prepreg 25 °C	2,9	0,2	Uhlík 80 °C	0,9	0,1



Obrázek 62 Graf poměrné deformace při mezi pevnosti těles vytvrzených na vzduchu a ponořených v H<sub>2</sub>O 1000h

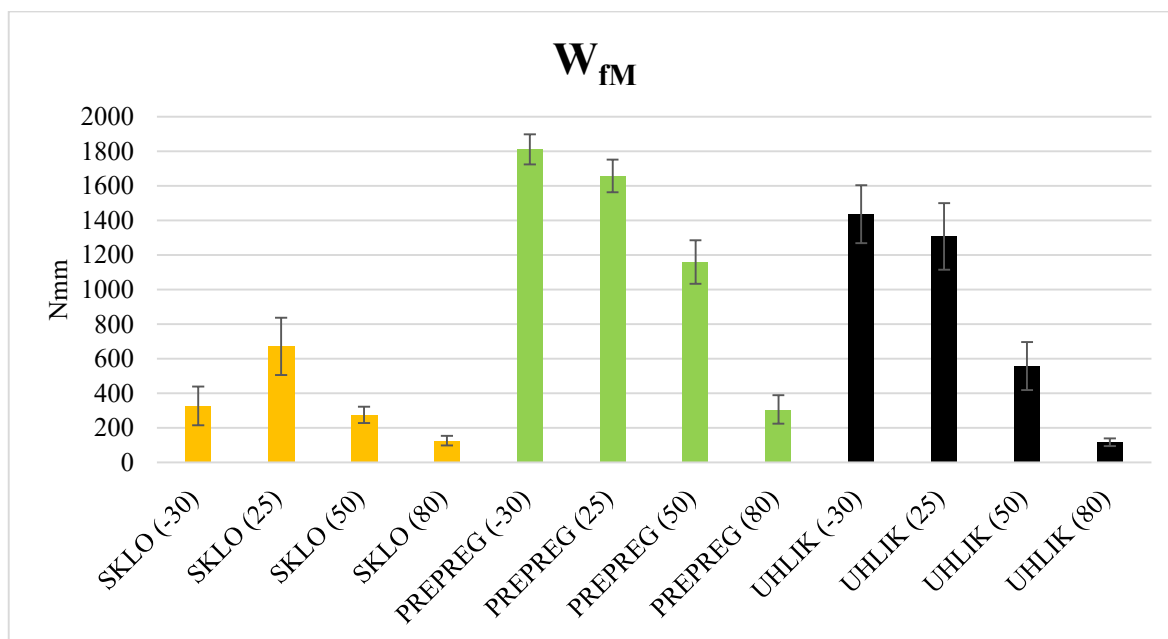
Skelný kompozit opět vykazuje několásobně vyšší hodnoty deformace oproti prepregu i uhlíku. Hodnoty uhlíkového kompozitu jsou o malý rozdíl nižší než prepreg.

#### 5.7.4 Deformační práce

V tabulce (Tabulka 31) jsou vypsané hodnoty deformační práce testovaných těles vytvrzených na vzduchu a vystavených vlhkosti 1000 hodin.

Tabulka 31 Hodnoty deformační práce těles vytvrzených na vzduchu a ponořených v  $H_2O$  1000h

Zkoušená série	Průměrná hodnota Nmm	Směrodatná odchylka Nmm	Zkoušená série	Průměrná hodnota Nmm	Směrodatná odchylka Nmm
Sklo -30 °C	326,62	112,65	Prepreg 50 °C	1159,51	126,39
Sklo 25 °C	671,34	166,11	Prepreg 80 °C	306,19	82,04
Sklo 50 °C	274,59	48,01	Uhlík -30 °C	1435,67	167,45
Sklo 80 °C	125,41	27,53	Uhlík 25 °C	1306,81	192,69
Prepreg -30 °C	1870,7	86,9	Uhlík 50 °C	556,82	139,23
Prepreg 25 °C	1657,13	93,92	Uhlík 80 °C	116,39	21,96



Obrázek 63 Graf deformační práce těles vytvrzených na vzduchu a ponořených v  $H_2O$  1000h

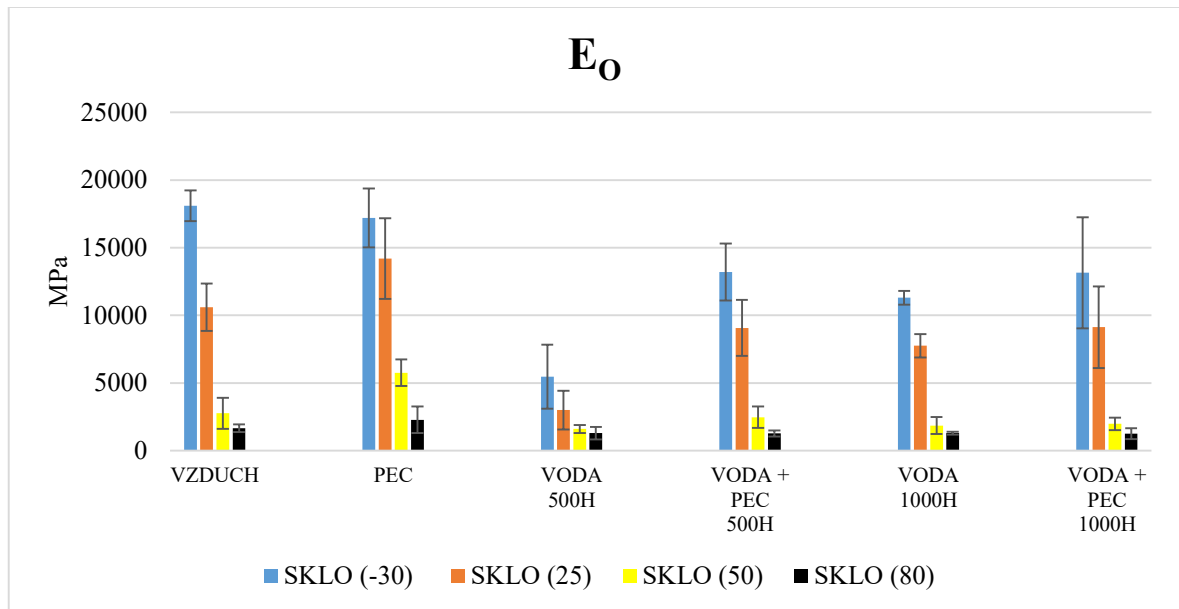
Nejvyšší deformační práci bylo potřeba vynaložit na prepreg i uhlíkový kompozit v teplotách -30 a 25 °C. Následně hodnoty s teplotou výrazně klesají. Na nejnižších hodnotách se pohybuje uhlíkový kompozit, kde nejvyšší práce byla vynaložena při teplotě 25 °C.



## 6 VYHODNOCENÍ NAMĚŘENÝCH HODNOT

### 6.1 Skelný kompozit

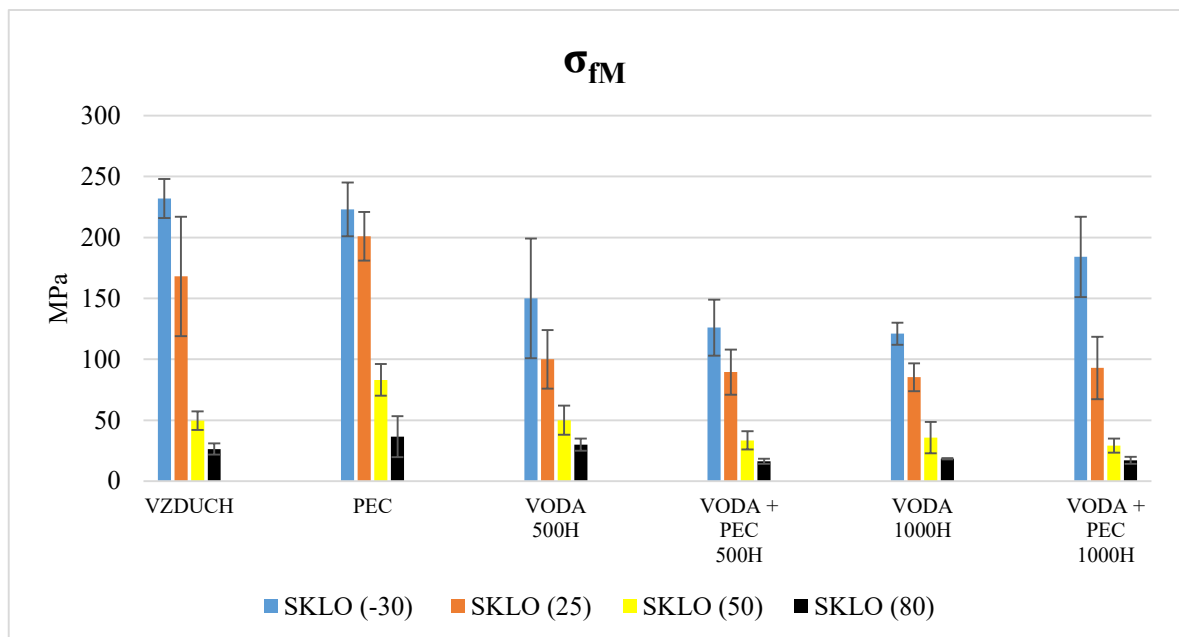
#### 6.1.1 Modul pružnosti v ohybu



Obrázek 64 Porovnání modulu pružnosti v ohybu skelného kompozitu

Série těles vytvrzených v peci, testovaných při teplotě  $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$  a nevystavených vlhkosti, vykazují nejvyšší modul pružnosti v ohybu. Tělesa vytvrzená na vzduchu mají mezi sebou podobné hodnoty, ovšem teploty  $25\text{ }^{\circ}\text{C}$  a  $50\text{ }^{\circ}\text{C}$  jsou výrazně odlišné. Vlhkost výrazně ovlivňuje modul pružnosti v ohybu, nejnižší hodnoty mají série vytvrzené na vzduchu a ponořené ve vodě po dobu 500 hodin. Následující vzorky s teplotami  $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$  a  $25\text{ }^{\circ}\text{C}$  mají poměrně vyšší hodnoty.

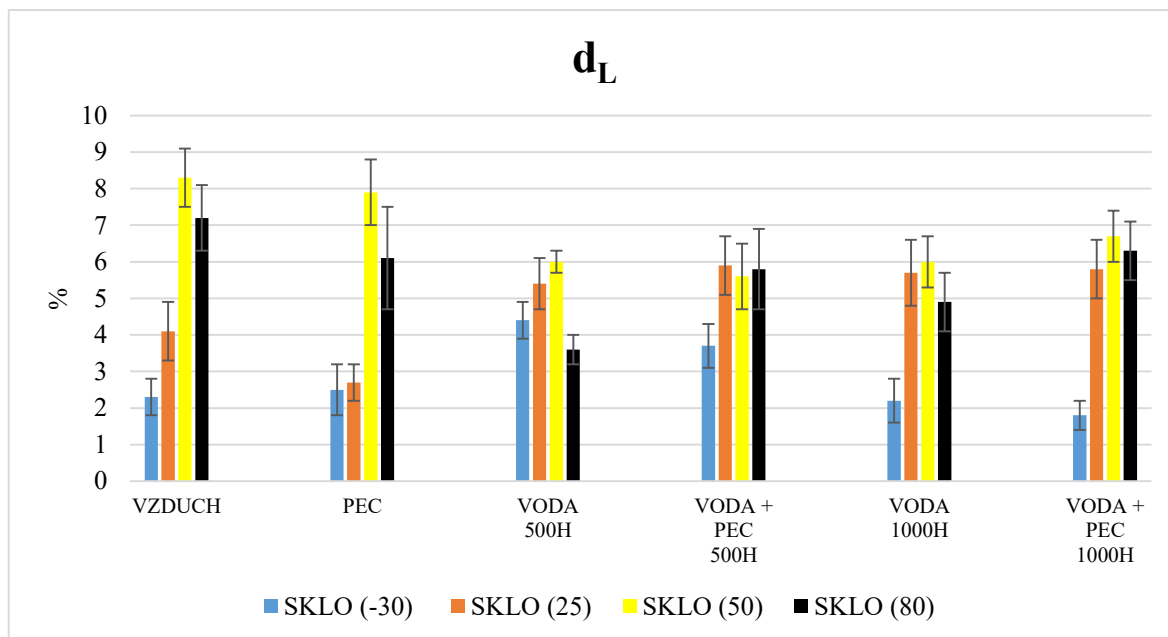
## 6.1.2 Pevnost v ohybu



Obrázek 65 Porovnání pevnosti v ohybu skelného kompozitu

Zde mají nejvyšší hodnoty opět vzorky vytvrzené v peci a nevystavené vlhkosti. Naopak nejnižší hodnoty vykazují tělesa vytvrzená na vzduchu a ponořená ve vodě 1000 hodin. U vzorků vytvrzených v peci při stejné vlhkosti nastal významný vzrůst při teplotě -30 °C. Těleso testováno při -80°C nevykazuje příliš velké odchylky ve všech možných variantách.

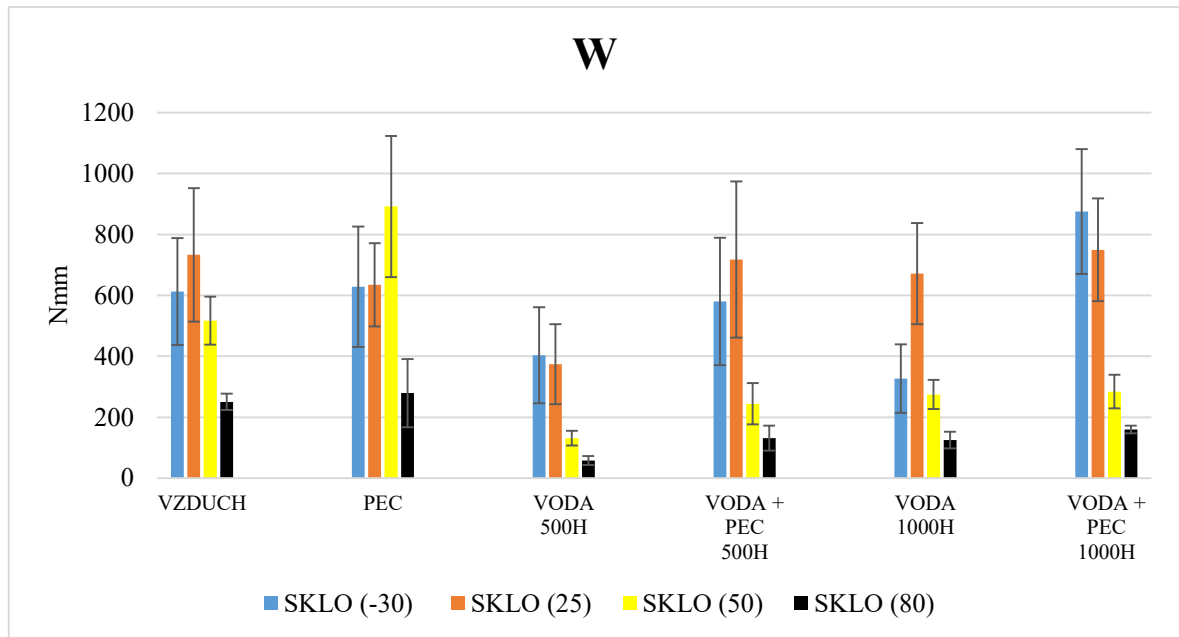
### 6.1.3 Poměrná deformace při mezi pevnosti



Obrázek 66 Porovnání poměrné deformace při mezi pevnosti skelného kompozitu

Hodnoty ukazují, že vlhkost a teplota má významný vliv na poměrnou deformaci při všech testovaných tělesech. Výsledky jsou viditelně menší než tělesa nevystavená těmto nepříznivým podmínkám. Vliv vlhkosti je zřetelný u teplot  $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ , kde s rostoucí dobou ponoření hodnoty výrazně klesají.

## 6.1.4 Deformační práce

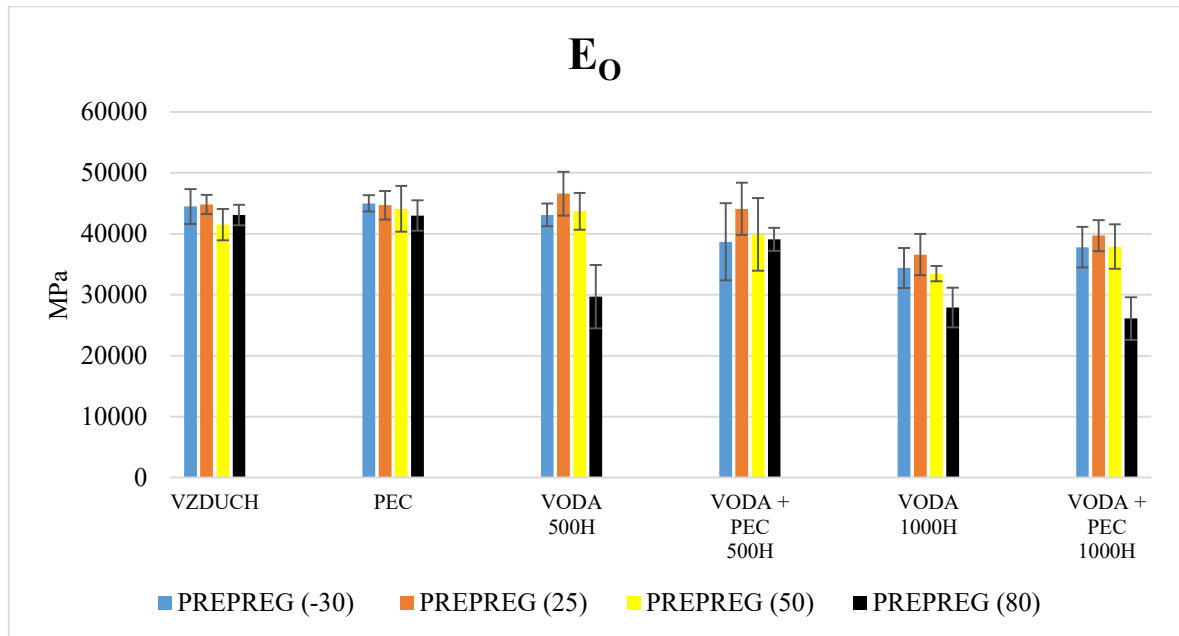


Obrázek 67 Porovnání deformační práce skelného kompozitu

Z grafu (Obrázek 67) lze vyčíst, že hodnoty deformační práce u těles vystavených vlhkosti mají stoupající tendenci. To naopak neplatí u těles vytvrzených na vzduchu, ponořených ve vodě 1000 hodin a testovaných při teplotě  $-30$  a  $25$  °C. Ty mají mírný pokles hodnot. Nejvyšší hodnotou okolo 900 Nmm vykazuje vzorek vytvrzený v peci, testován při teplotě  $50$  °C a vzorek testován při teplotě  $-30$  °C, též vytvrzen v peci a ponořen ve vodě 1000 hodin.

## 6.2 Prepreg

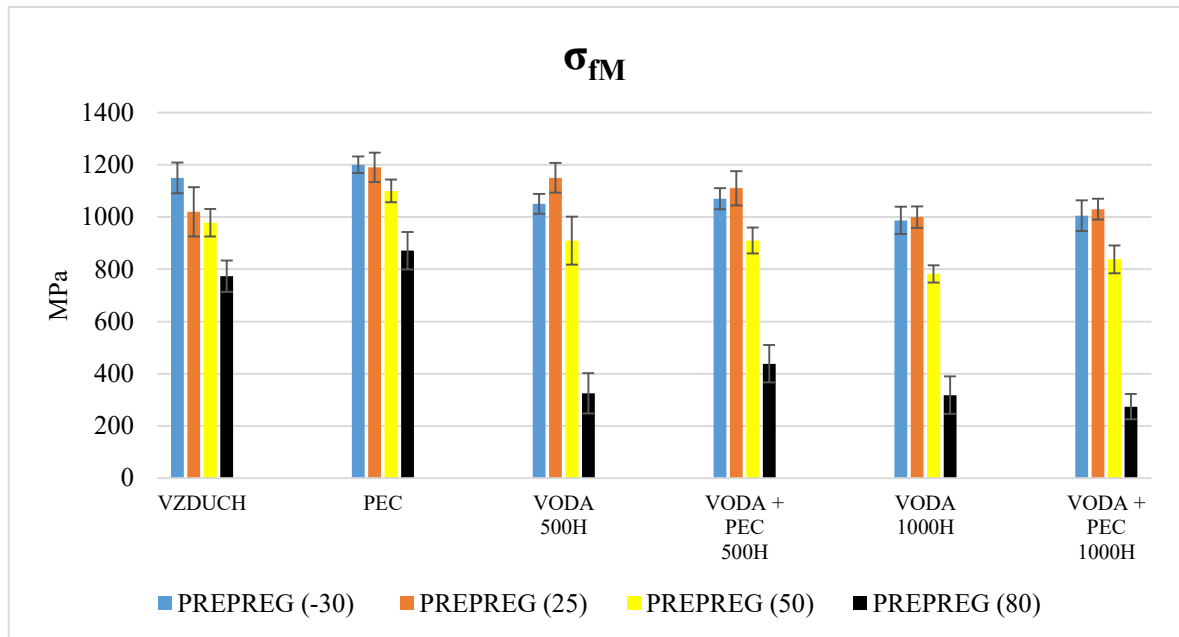
### 6.2.1 Modul pružnosti v ohybu



Obrázek 68 Porovnání modulu pružnosti v ohybu prepregu

Vliv vlhkosti je zde poměrně nízký, rozdíly jsou nepatrné. S rostoucí dobou ponoření hodnoty mírně klesají. Naopak tělesa nevystavená žádné vlhkosti vykazují téměř totožné hodnoty. S nimi můžeme porovnávat tělesa vytvrzená v peci a ponořena ve vodě 500 hodin.

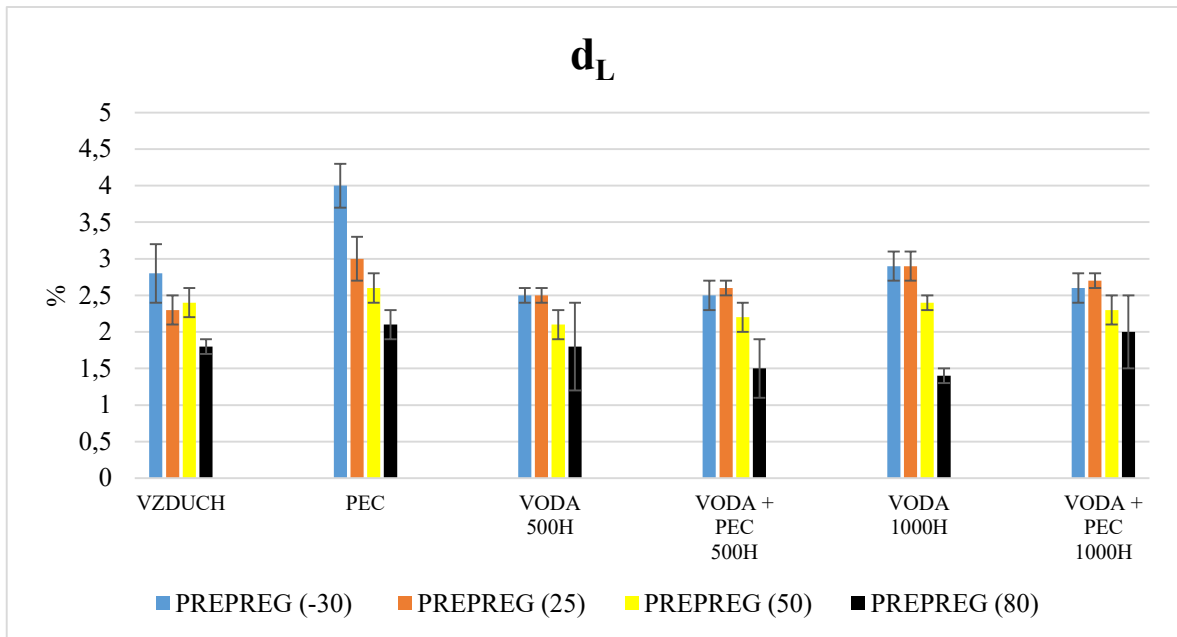
## 6.2.2 Pevnost v ohybu



Obrázek 69 Porovnání pevnosti v ohybu prepregu

Vliv vlhkosti u pevnosti v ohybu prepregu nehraje příliš velký význam, hodnoty se liší pouze mírně. Naopak teplota hraje výraznou roli nejen u prepregu testovaného při 50 °C, ale převážně při 80 °C. Zde je pokles několikanásobný, což neplatí u vzorků nevystavených vlhkosti.

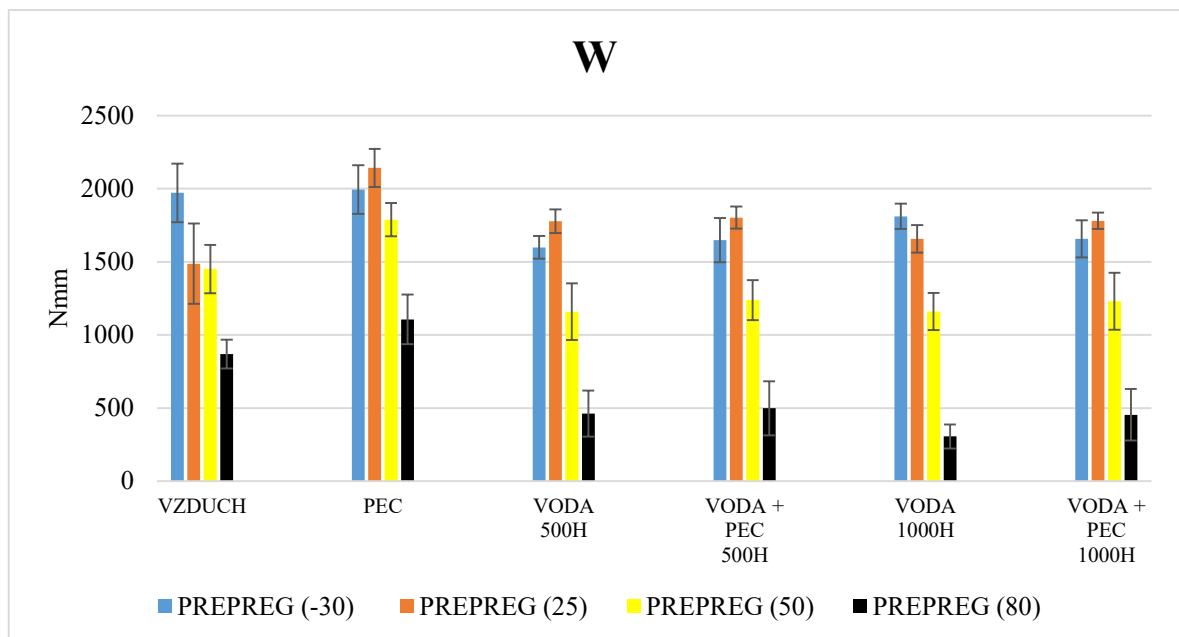
### 6.2.3 Poměrná deformace při mezi pevnosti



Obrázek 70 Porovnání poměrné deformace při mezi pevnosti prepregu

Tělesa vytvrzená v peci vykazují největší procento poměrné deformace při mezi pevnosti, a to ve všech testovaných teplotách. Nejnižší hodnoty má prepreg vytvrzený na vzduchu a ponořený ve vodě 500 hodin při teplotách -30 a 25 °C. Též prepreg testován při 80 °C a ponořený ve vodě 1000 hodin. Zde opět je vliv teploty podstatně vyšší než vliv vlhkosti.

## 6.2.4 Deformační práce



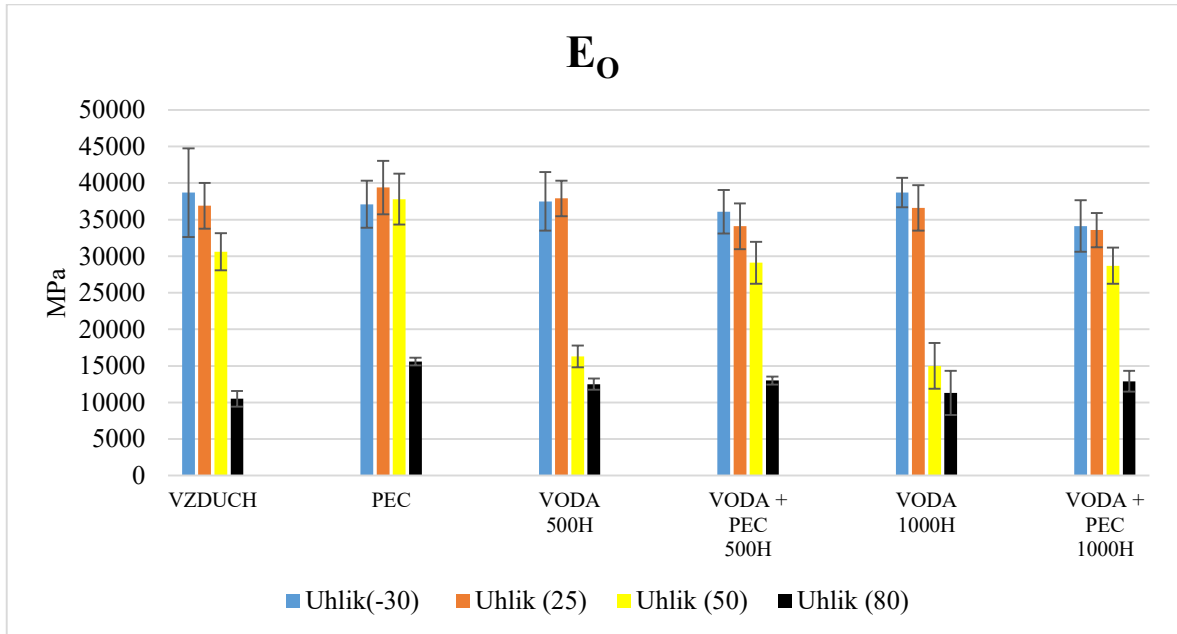
Obrázek 71 Porovnání deformační práce prepregu

U deformační práce teplota hraje poměrně výraznou roli při testování těles. Jejich pokles je zřetelný oproti tělesům, které nebyly vystaveny vlhkosti. Nejnižší deformační práci bylo zapotřebí u prepregu vytvrzeného na vzduchu, ponořeného ve vodě 1000 hodin a testovaného při 80 °C.



## 6.3 Uhlíkový kompozit

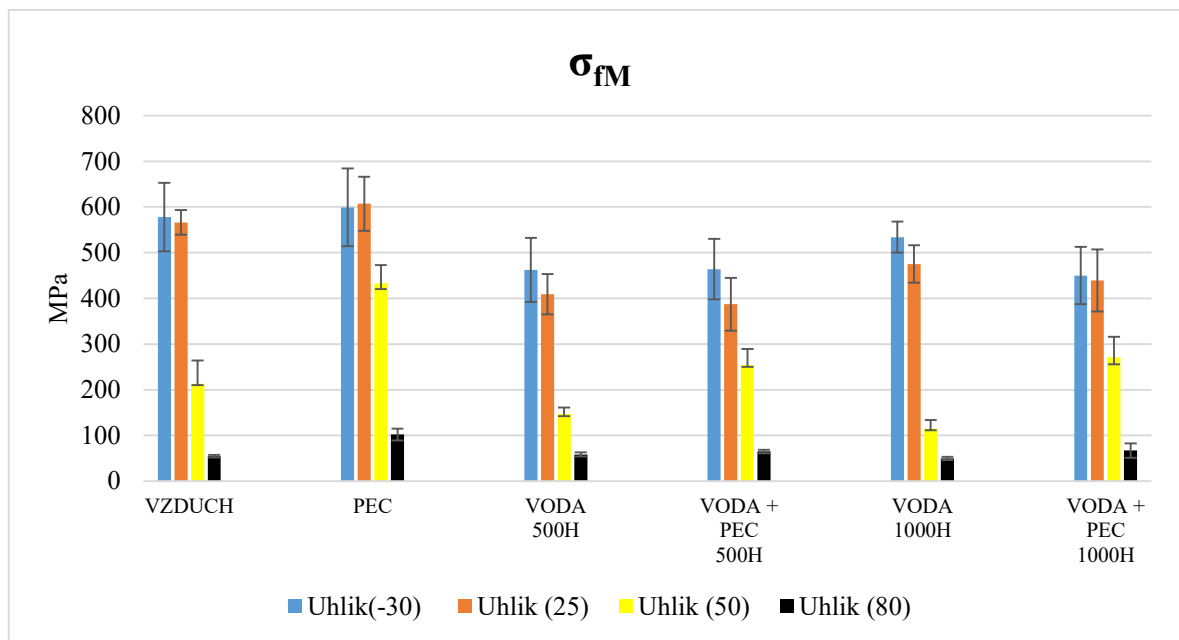
### 6.3.1 Modul pružnosti v ohybu



Obrázek 72 Porovnání modulu pružnosti v ohybu uhlíkového kompozitu

Vliv teploty u uhlíkového kompozitu výrazně ovlivnil modul pružnosti v ohybu, a to u vzorků testovaných při teplotě 80 °C a vytvrzených na vzduchu. Tělesa vytvrzená v peci, vystavená vlhkosti a testována při stejných teplotách, mají téměř totožné hodnoty. Oproti uhlíku vytvrzeném v peci a nevystaveném vlhkosti jsou tyto hodnoty nepatrně nižší. Tělesa vytvrzená v peci a nevystavená vlhkosti se vyznačují nejvyššími hodnotami.

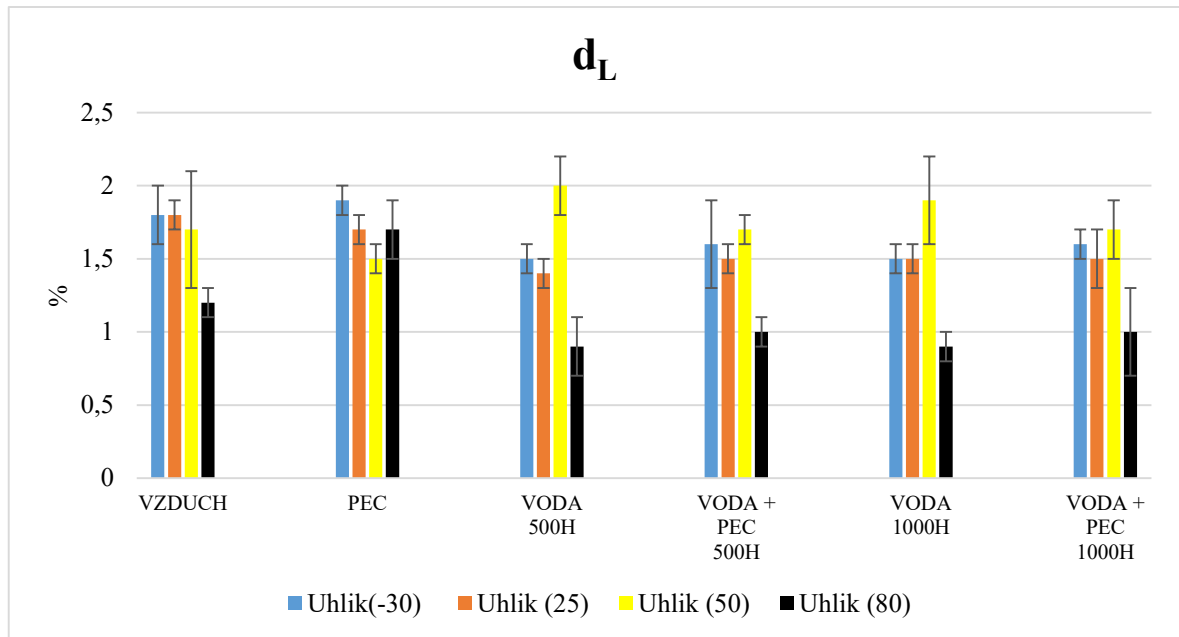
### 6.3.2 Pevnost v ohybu



Obrázek 73 Porovnání pevnosti v ohybu uhlíkového kompozit

Pevnost v ohybu je nejvyšší u testovaných vzorků, které byly pouze vytvrzeny v peci a nevystaveny vlivu vlhkosti. Naopak tělesa vystavená vlhkosti, znázorňují poměrný pokles hodnot. Vzorky vytvrzené na vzduchu, ponořené ve vodě 1000 a testované při 50 °C, vykazují pokles pevnosti v ohybu.

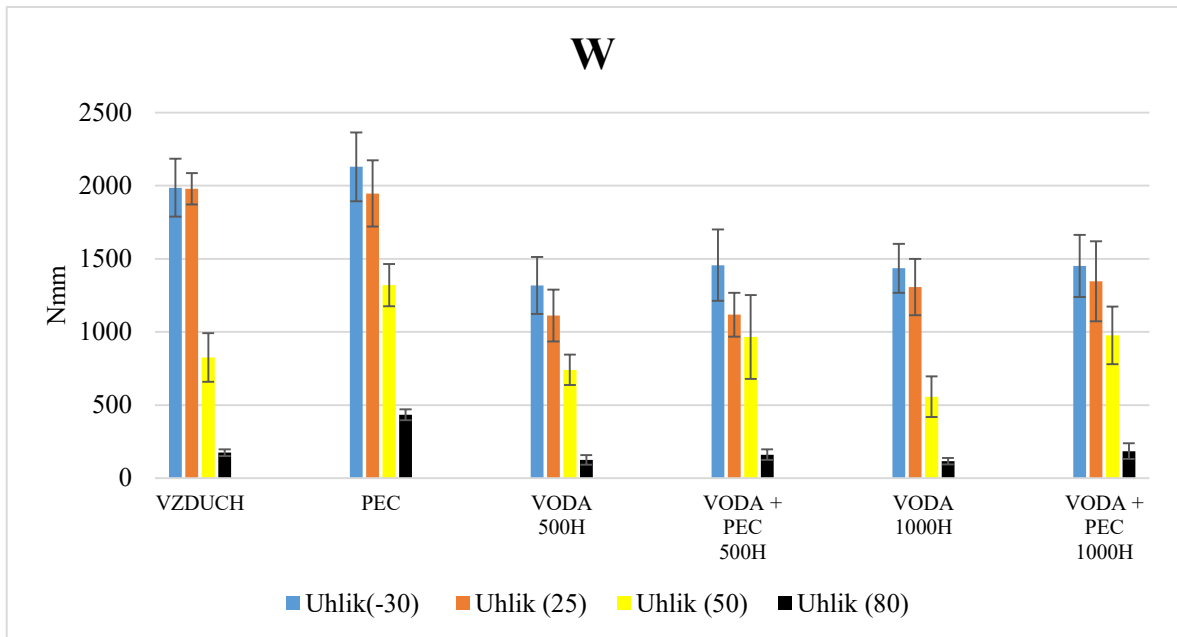
### 6.3.3 Poměrná deformace při mezi pevnosti



Obrázek 74 Porovnání poměrné deformace při mezi pevnosti uhlíkového kompozitu

Nejvyšší poměrnou deformaci při mezi pevnosti má uhlík vytvrzen v peci a nevystaven vlhkosti, vyjma teploty 50 °C. Při této teplotě vychází s nejvyšší hodnotou okolo 2 % uhlík vytvrzen na vzduchu a ponořen ve vodě 500 hodin. Vliv teploty u uhlíku nevystaveného vlhkosti a vytvrzeného v peci hraje výrazný vliv. Zde s rostoucí teplotou poměrná deformace klesá, vyjma u teploty 80 °C. Vlhkost má dopad na testované vzorky, ale ne tak razantní jako teplota. Odchylna se vyskytuje u uhlíku vytvrzeného na vzduchu a ponořeného ve vodě 1000 hodin.

## 6.3.4 Deformační práce



Obrázek 75 Porovnání deformační práce uhlíkového kompozitu

Teplota výrazně ovlivňuje hodnoty deformační práce, a to převážně při vyšších hodnotách. S rostoucí vlhkostí také rostou hodnoty a mají snahu se přiblížit hodnotám vzorků, nevystavených žádné vlhkosti. Zde ovšem nepatří hodnoty testované při teplotě 80 °C, a také uhlík vytvrzen na vzduchu, ponořen ve vodě 1000 hodin a testován při teplotě 50 °C.

## ZÁVĚR

Diplomová práce řeší problém vlivu teploty a vlhkosti na mechanické vlastnosti kompozitních materiálů vyskytujících se v náročných podmínkách. Cílem diplomové práce bylo porovnání chování tří druhů kompozitních materiálů vystavených různým vlhkostem a testovaných při daných teplotách. Také porovnání vlivu použité technologie na výrobu zkušebních těles. Tyto testy charakterizují chování kompozitu v praxi.

Byla provedena řada statických zkoušek ohybem kompozitního materiálu. Výsledky byly mezi jednotlivými druhy kompozitu porovnány.

Z výsledků vyplývá, že vliv teploty hraje výrazně vyšší roli na mechanické chování kompozitu než vliv vlhkosti. Tělesa vystavená vlhkosti charakterizují pokles hodnot oproti tělesům, která vlivu vlhkosti nebyla vystavena. U všech zkoušek mají nejvyšší hodnotu vzorky, které byly pouze vytvrzeny v peci a nevystaveny žádné vlhkosti. Ve srovnání použité technologie vyšlo najevo, že tělesa vytvrzené v peci mají lepší mechanické vlastnosti, než tělesa vytvrzené na vzduchu.

Nejvyšších hodnot modulu pružnosti v ohybu dosahuje prepreg, kde vliv vlhkosti nehraje výraznou roli. Nastává mírný pokles až po 1000 hodinách ponořeného vzorku ve vodě. Teplota ovlivňuje vlastnosti, ale až při 80 °C. Na druhém místě je uhlíkový kompozit, který je odolnější vůči vlhkosti, ale teplota již kolem 50 °C snižuje mechanické vlastnosti. Skelný kompozit má hodnoty nejnižší, vliv teploty a vlhkosti je výrazný, a také vliv použité technologie.

Pevnost v ohybu opět má nejvyšší prepreg. Hodnoty mírně klesají při 1000 hodinách ve vodě. Nastává opět výrazný pokles při teplotách kolem 80 °C. Zde je vliv vlhkosti nepatrný. Uhlíkový kompozit značí větší vliv vlhkosti, hodnoty mají až 30% propad. Teplota 50 a 80 °C opět výrazně snižuje hodnoty. Skelný kompozit má nejnižší pevnost v ohybu, zde teplota i vlhkost hrají velký význam. Vliv technologie zvyšuje pevnost pouze u těles ponořených ve vodě po dobu 1000 hodin.

Největší míru poměrné deformace při mezi pevnosti vykazuje skelný kompozit. U těles nevystavených vlhkosti nastává extrémní nárůst při teplotách 50 °C a 80 °C. Vlhkost následně tyto hodnoty snižuje. Naopak s rostoucí teplotou poměrná deformace roste. U prepregu vystaveného vlhkosti poměrná deformace klesá, a to převážně při teplotě 80 °C. Vliv

vlhkosti na poměrnou deformaci uhlíkového kompozitu je mírný. Teplota ovlivňuje hodnoty při teplotě 50 °C, kde vytvrzení v peci tyto hodnoty snižuje.

Největší deformační práci bylo zapotřebí dodat u prepregu. Vliv vlhkosti je nepatrný oproti vzorkům jí nevystavených. Doba ponoření vzorků není téměř odlišná. Teplota snižuje hodnoty od 50 °C. U uhlíku nastává větší propad mezi vzorky vystavených a nevystavených vlhkosti. Opět doba ponoření není důležitá. Teplotní chování je velmi podobné jako u prepregu. Skelný kompozit charakterizuje největší vliv teploty i vlhkosti. Teplota výrazně mění mechanické chování. S rostoucí dobou ponoření deformační práce roste.

**SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY**

- [1] EHRENSTEIN, Gottfried W. *Polymerní kompozitní materiály*. V ČR 1. vyd. Praha: Scientia, 2009, 351 s. ISBN 978-80-86960-29-6.
- [2] AGARWAL, Bhagwan D. a Lawrence J. BROUTMAN. *Vláknové kompozity*. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1987, 294 s.
- [3] BAREŠ, Richard. *Kompozitní materiály*. Praha: SNTL, 1988, 325 s.
- [4] PTÁČEK, Luděk. *Nauka o materiálu II. 2.*, opr. a rozš. vyd. Brno: CERM, 2002, 392 s. ISBN 80-7204-248-3.
- [5] RAAB, Miroslav. *Materiály a člověk: (netradiční úvod do současné materiálové vědy)*. Praha: Encyklopedický dům, 1999, 228 s. ISBN 8086044130.
- [6] VOJTĚCH, Dalibor. *Materiály a jejich mezní stavy*. V Praze: Vysoká škola chemicko-technologická, 2010, 204 s. ISBN 978-80-7080-741-5.
- [7] DAĐOUREK, Karel. *Kompozitní materiály - druhy a jejich užití*. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2007, 114 s. ISBN 978-80-7372-279-1.
- [8] LAŠ, Vladislav. *Mechanika kompozitních materiálů*. Plzeň: Západočeská univerzita, 2004, 154 s. ISBN 80-7043-273-X.
- [9] DAĐOUREK, Karel. *Kompozitní materiály - modely a vlastnosti*. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2005, 55 s. ISBN 80-7083-972-4.
- [10] SKÁLOVÁ, Jana, Jaroslav KOUTSKÝ a Vladislav MOTYČKA. *Nauka o materiálech*. 4. vyd. V Plzni: Západočeská univerzita, 2010, 232 s. ISBN 978-80-7043-244-0.
- [11] JANČÁŘ, Josef. *Úvod do materiálového inženýrství polymerních kompozitů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta chemická, 2003, 193 s. ISBN 8021424435.
- [12] KORÍNEK, Z. Kompozity. [online]. [vid. 2014-04-25]. Dostupné z: <http://www.volny.cz/zkorinek/technologie.pdf>
- [13] CHUNG, Deborah D. L. *Composite materials: functional materials for modern technologies*. London: Springer, 2003. 289 s. ISBN 185233665X
- [14] [online]. [cit. 2019-01-22]. Dostupné z: <http://cz.firewheel-de.cc/fiberglass-textiles/>

[15] KADLEC, Martin. Změny pevnosti a tuhosti polymerního kompozitu v závislosti na teplotě, vlhkosti a prostředí: *Vliv prostředí na vlastnosti kompozitních materiálů a konstrukcí*. 22.11.2017. Ústav teoretické a aplikované mechaniky AV ČR v. v. i., Praha, 2017.

[16] ŽALUDEK, Milan, Vladimír RUSNÁK a Soňa RUSNÁKOVÁ. *Účinky chemického prostředí a klimatického působení na vlastnosti kompozitu* [online]. Horní Lideč, ČR, , 20 [cit. 2019-03-27]. Dostupné z: [http://www.csm-kompozity.wz.cz/Zaludek\\_ucinky\\_prostredi.pdf](http://www.csm-kompozity.wz.cz/Zaludek_ucinky_prostredi.pdf)

[17] MINSTER, Jiří. *Hodnocení vlivu dlouhodobého stárnutí kompozitních materiálů a konstrukcí užitím akcelerovaných zkušebních metod* [online]. ÚTAM AV ČR, 2017 [cit. 2019-03-27]. [Http://www.csm-kompozity.wz.cz/Minster\\_Hodnoceni.pdf](Http://www.csm-kompozity.wz.cz/Minster_Hodnoceni.pdf).

[18] Damaškové nože | Damašková ocel. Damaškové nože | *Damaškové nože* [online]. Dostupné z: <http://www.damaskovenoze.wbs.cz/Damaskova-ocel.html>

[19] HOMOLA, Petr. Vliv prostředí na kompozitní materiály a konstrukce v letectví: *Chování kompozitů při rázovém zatížení* . 13.11.2018. Ústav teoretické a aplikované mechaniky AV ČR v. v. i., Praha, 2018.

[20] *Modeling the Transport of Low-Molecular-Weight Penetrants Within Polymer Matrix Composites* | *Applied Mechanics Reviews* | ASME DC. Object moved [online]. Copyright © Copyright [cit. 09.05.2019]. Dostupné z: <http://asmedigitalcollection.asme.org/index.aspx>



**SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK**

$E_0$	Modul pružnosti v ohybu
$d_L$	Poměrná deformace při mezi pevnosti
$\sigma_{FM}$	Pevnost v ohybu
W	Deformační práce
LS	Low Shrink
h	Hodina
cm	Centimetr
mm	Milimetr
$\mu\text{m}$	Mikrometr
kg	Kylogram
MPa	Megapascal
GPa	Gigapascal
%	Pocento
$^{\circ}\text{C}$	Stupeň Celsia
km	Kilometr
kN	Kilonewton
Nmm	Newtonmilimetr
UV	Ultrafialové
H <sub>2</sub> O	Voda
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	Kyselina sírová

## SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obrázek 1</i> Damascová ocel [18] .....	13
<i>Obrázek 2</i> Synergický efekt [7] .....	15
<i>Obrázek 3</i> Ruční kladení [12] .....	16
<i>Obrázek 4</i> Vakuové lisování [13] .....	18
<i>Obrázek 5</i> Jednosměrně a vícesměrně orientovaný prepreg [8] .....	20
<i>Obrázek 6</i> Výroba jednosměrně orientovaného prepregu [1] .....	21
<i>Obrázek 7</i> Jednokroková výroba prepregu [8] .....	21
<i>Obrázek 8</i> Dvoukroková výroba prepregu [8] .....	22
<i>Obrázek 9</i> Matrice jednotlivých materiálů [4] .....	23
<i>Obrázek 10</i> Druhy vazeb výztužných materiálů [1] .....	25
<i>Obrázek 11</i> Skelné vlákna [14] .....	27
<i>Obrázek 12</i> Uhlíkové vlákna [14] .....	27
<i>Obrázek 13</i> Kritické degradační mechanismy polymerních kompozitů [17] .....	29
<i>Obrázek 14</i> Porušení rozhraní vlákno/matrice [15] .....	30
<i>Obrázek 15</i> Vliv teploty na pevnost [15] .....	30
<i>Obrázek 16</i> Průřez vláknem při 600 °C po dobu 2 hodin [15] .....	31
<i>Obrázek 17</i> Vliv teploty na matrici [15] .....	32
<i>Obrázek 18</i> Vliv teploty na porušení vzorku při tlakové zkoušce [15] .....	32
<i>Obrázek 19</i> Přírůstek hmotnosti při vlhčení. [15] .....	33
<i>Obrázek 20</i> Lomová plocha [15] .....	34
<i>Obrázek 21</i> Vliv teploty na porušení vzorku při tahové zkoušce [15] .....	35
<i>Obrázek 22</i> Vliv teploty a vlhkosti na mez pevnosti v tahu jednosměrných laminátů z epoxidových pryskyřic a uhlíkových vláken namáhaných rovnoběžně a kolmo ke směru vláken [1] .....	36
<i>Obrázek 23</i> Průřez navlhčeným kompozitem [20] .....	37
<i>Obrázek 24</i> Modul pružnosti $E$ a mez pevnosti $\sigma_p$ v tahu a ohybu před (etalon) a po expozici v $H_2O$ o $T=50^\circ C$ [16] .....	38
<i>Obrázek 25</i> Modul pružnosti $E$ a mez pevnosti $\sigma_p$ v tahu a ohybu před a po expozici 500h v 30% $H_2SO_4$ o $T=23^\circ C$ [16] .....	39
<i>Obrázek 26</i> Modul pružnosti $E$ a mez pevnosti $\sigma_p$ v tahu a ohybu před a po 8h expozici na vzduchu při $T=150^\circ C$ [16] .....	39
<i>Obrázek 27</i> Vliv prostředí na pevnost v tahu [16] .....	40

<i>Obrázek 28 Vliv prostředí na pevnost v ohybu [16]</i> .....	41
<i>Obrázek 29 Vliv prostředí na rázovou houževnatost v ohybu [16]</i> .....	41
<i>Obrázek 30 Nanášení vosku na formu</i> .....	43
<i>Obrázek 31 Nastříhaná a vážená tkanina</i> .....	44
<i>Obrázek 32 Tabule skelného a uhlíkového kompozitu</i> .....	44
<i>Obrázek 33 Nastříhaný prepreg</i> .....	45
<i>Obrázek 34 7 vrstev prepregu uložených v pečícím papíře</i> .....	46
<i>Obrázek 35 Ruční lis</i> .....	46
<i>Obrázek 36 Hotový výrobek</i> .....	47
<i>Obrázek 37 Vodní paprsek Flow Mach3 Waterjet</i> .....	47
<i>Obrázek 38 Zkušební stroj Zwick 1456</i> .....	48
<i>Obrázek 39 Uspořádání tříbodového zatěžování</i> .....	49
<i>Obrázek 40 Graf modulu pružnosti v ohybu těles vytvrzených na vzduchu</i> .....	51
<i>Obrázek 41 Graf pevnosti v ohybu těles vytvrzených na vzduchu</i> .....	52
<i>Obrázek 42 Graf poměrné deformace při mezi pevnosti těles vytvrzených na vzduchu</i> .....	53
<i>Obrázek 43 Graf deformační práce těles vytvrzených na vzduchu</i> .....	54
<i>Obrázek 44 Graf modulu pružnosti v ohybu těles vytvrzených v peci</i> .....	56
<i>Obrázek 45 Graf pevnosti v ohybu těles vytvrzených v peci</i> .....	57
<i>Obrázek 46 Graf poměrné deformace při mezi pevnosti těles vytvrzených v peci</i> .....	58
<i>Obrázek 47 Graf deformační práce těles vytvrzených v peci</i> .....	59
<i>Obrázek 48 Graf modulu pružnosti v ohybu těles vytvrzených v peci a ponořených v H<sub>2</sub>O 500h</i> .....	61
<i>Obrázek 49 Graf pevnosti v ohybu těles vytvrzených v peci a ponořených v H<sub>2</sub>O 500h</i> .....	62
<i>Obrázek 50 Graf poměrné deformace při mezi pevnosti těles vytvrzených v peci a ponořených v H<sub>2</sub>O 500h</i> .....	63
<i>Obrázek 51 Graf deformační práce těles vytvrzených v peci a ponořených v H<sub>2</sub>O 500h</i> .....	64
<i>Obrázek 52 Graf modulu pružnosti v ohybu těles vytvrzených na vzduchu a ponořených v H<sub>2</sub>O 500h</i> .....	66
<i>Obrázek 53 Graf pevnosti v ohybu těles vytvrzených na vzduchu a ponořených v H<sub>2</sub>O 500h</i> .....	67

Obrázek 54 Graf poměrné deformace při mezi pevnosti těles vytvrzených na vzduchu a ponořených v $H_2O$ 500h .....	68
Obrázek 56 Graf deformační práce těles vytvrzených na vzduchu a ponořených v $H_2O$ 500h .....	69
Obrázek 57 Graf modulu pružnosti v ohybu těles vytvrzených v peci a ponořených v $H_2O$ 1000h .....	71
Obrázek 58 Graf pevnosti v ohybu těles vytvrzených v peci a ponořených v $H_2O$ 1000h .....	72
Obrázek 59 Graf poměrné deformace při mezi pevnosti těles vytvrzených v peci a ponořených v $H_2O$ 1000h .....	73
Obrázek 60 Graf deformační práce těles vytvrzených v peci a ponořených v $H_2O$ 1000h .....	74
Obrázek 61 Graf modulu pružnosti v ohybu těles vytvrzených na vzduchu a ponořených v $H_2O$ 1000h .....	76
Obrázek 62 Graf pevnosti v ohybu těles vytvrzených na vzduchu a ponořených v $H_2O$ 1000h .....	77
Obrázek 63 Graf poměrné deformace při mezi pevnosti těles vytvrzených na vzduchu a ponořených v $H_2O$ 1000h .....	78
Obrázek 64 Graf deformační práce těles vytvrzených na vzduchu a ponořených v $H_2O$ 1000h .....	79
Obrázek 65 Porovnání modulu pružnosti v ohybu skelného kompozitu .....	81
Obrázek 66 Porovnání pevnosti v ohybu skelného kompozitu .....	82
Obrázek 67 Porovnání poměrné deformace při mezi pevnosti skelného kompozitu ..	83
Obrázek 68 Porovnání deformační práce skelného kompozitu .....	84
Obrázek 69 Porovnání modulu pružnosti v ohybu prepregu .....	85
Obrázek 70 Porovnání pevnosti v ohybu prepregu .....	86
Obrázek 71 Porovnání poměrné deformace při mezi pevnosti prepregu .....	87
Obrázek 72 Porovnání deformační práce prepregu .....	88
Obrázek 73 Porovnání modulu pružnosti v ohybu uhlíkového kompozitu .....	89
Obrázek 74 Porovnání pevnosti v ohybu uhlíkového kompozit .....	90
Obrázek 75 Porovnání poměrné deformace při mezi pevnosti uhlíkového kompozitu .....	91
Obrázek 76 Porovnání deformační práce uhlíkového kompozitu .....	92

## Seznam tabulek

<i>Tabulka 1 Vlastnosti výrobků vyrobených ručním nanášením [11] .....</i>	<i>17</i>
<i>Tabulka 2 Vlastnosti výrobků vyrobených vakuovým lisováním [11] .....</i>	<i>19</i>
<i>Tabulka 3 Vlastnosti přírodních vláken [7] .....</i>	<i>26</i>
<i>Tabulka 4 Vliv teploty na pevnost [15] .....</i>	<i>31</i>
<i>Tabulka 5 Zkušební rychlost .....</i>	<i>49</i>
<i>Tabulka 6 Rozměry zatěžovacích trnů .....</i>	<i>50</i>
<i>Tabulka 7 Zkušební tělesa pro tříbodový ohyb .....</i>	<i>50</i>
<i>Tabulka 8 Hodnoty modulu pružnosti v ohybu těles vytvrzených na vzduchu .....</i>	<i>51</i>
<i>Tabulka 9 Hodnoty modulu pevnosti v ohybu těles vytvrzených na vzduchu .....</i>	<i>52</i>
<i>Tabulka 10 Hodnoty poměrné deformace při mezi pevnosti těles vytvrzených na vzduchu .....</i>	<i>53</i>
<i>Tabulka 11 Hodnoty deformační práce těles vytvrzených na vzduchu .....</i>	<i>54</i>
<i>Tabulka 12 Hodnoty modulu pružnosti v ohybu těles vytvrzených v peci .....</i>	<i>56</i>
<i>Tabulka 13 Hodnoty pevnosti v ohybu těles vytvrzených v peci .....</i>	<i>57</i>
<i>Tabulka 14 Hodnoty poměrné deformace při mezi pevnosti těles vytvrzených v peci .....</i>	<i>58</i>
<i>Tabulka 15 Hodnoty deformační práce těles vytvrzených v peci .....</i>	<i>59</i>
<i>Tabulka 16 Hodnoty modulu pružnosti v ohybu těles vytvrzených v peci a ponořených v H<sub>2</sub>O 500h .....</i>	<i>61</i>
<i>Tabulka 17 Hodnoty pevnosti v ohybu těles vytvrzených v peci a ponořených v H<sub>2</sub>O 500h .....</i>	<i>62</i>
<i>Tabulka 18 Hodnoty poměrné deformace při mezi pevnosti těles vytvrzených v peci a ponořených v H<sub>2</sub>O 500h .....</i>	<i>63</i>
<i>Tabulka 19 Hodnoty deformační práce těles vytvrzených v peci a ponořených v H<sub>2</sub>O 500h .....</i>	<i>64</i>
<i>Tabulka 20 Hodnoty modulu pružnosti v ohybu těles vytvrzených na vzduchu a ponořených v H<sub>2</sub>O 500h .....</i>	<i>66</i>
<i>Tabulka 21 Hodnoty pevnosti v ohybu těles vytvrzených na vzduchu a ponořených v H<sub>2</sub>O 500h .....</i>	<i>67</i>
<i>Tabulka 22 Hodnoty poměrné deformace při mezi pevnosti těles vytvrzených na vzduchu a ponořených v H<sub>2</sub>O 500h .....</i>	<i>68</i>
<i>Tabulka 23 Hodnoty deformační práce těles vytvrzených na vzduchu a ponořených v H<sub>2</sub>O 500h .....</i>	<i>69</i>

<i>Tabulka 24</i> Hodnoty modulu pružnosti v ohybu těles vytvrzených v peci a ponořených v $H_2O$ 1000h .....	71
<i>Tabulka 25</i> Hodnoty pevnosti v ohybu těles vytvrzených v peci a ponořených v $H_2O$ 1000h .....	72
<i>Tabulka 26</i> Hodnoty poměrné deformace při mezi pevnosti těles vytvrzených v peci a ponořených v $H_2O$ 1000h .....	73
<i>Tabulka 27</i> Hodnoty deformační práce těles vytvrzených v peci a ponořených v $H_2O$ 1000h .....	74
<i>Tabulka 28</i> Hodnoty modulu pružnosti v ohybu těles vytvrzených na vzduchu a ponořených v $H_2O$ 1000h .....	76
<i>Tabulka 29</i> Hodnoty pevnosti v ohybu těles vytvrzených na vzduchu a ponořených v $H_2O$ 1000h .....	77
<i>Tabulka 30</i> Hodnoty poměrné deformace při mezi pevnosti těles vytvrzených na vzduchu a ponořených v $H_2O$ 1000h .....	78
<i>Tabulka 31</i> Hodnoty deformační práce těles vytvrzených na vzduchu a ponořených v $H_2O$ 1000h .....	79

**SEZNAM PŘÍLOH**

Příloha I: Materiálový list Epoxidová pryskyřice L 385 (MGS) a Tužidlo 285 (MGS)

Příloha II: Materiálový list Skelná tkanina 280 g/m<sup>2</sup>

Příloha III: Materiálový list Uhlíková tkanina 200 g/m<sup>2</sup>

Příloha IV: Materiálový list Deltapreg VV430U – DT860W-39

Příloha V: Separální vosk Havel Wax 60 – x3

# PŘÍLOHA P I: MATERIÁLOVÝ LIST EPOXIDOVÁ PRYSKYŘICE L 385 (MGS) A TUŽIDLO 285 (MGS)

## LAMINAČNÍ PRYSKYŘICE L 285 TUŽIDLA 285, 286, 287

### Návod k použití, technické listy

#### Charakteristika

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

#### Specifikace

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

		Tužidlo 285	Tužidlo 286	Tužidlo 287
Hustota °C	g/cm <sup>3</sup> / 25	0,94 - 0,97	0,94 - 0,97	0,93 - 0,96
Viskozita °C	mPas / 25	50 - 100	60 - 100	80 - 100
Aminové číslo G	mg KOH / G	480 - 550	450 - 500	450 - 500
Barva Gardner		max 3 (*)	max 3 (*)	max 3 (*)

(\*) Vztahuje se pouze k průsvitnému tužidlu - tužidla mají průsvitně modrou barvu



### Podrobnosti pro zpracování

	Pryskyřice L 285	Tužidlo 285	Tužidlo 286	Tužidlo 287
Průměrná EP - hodnota	0,62	-	-	-
Průměrný ekvivalent aminu	-	64	64	64

### Technické informace o zesílené pryskyřici

#### Statické testy

Vytvrzení: 24 h při 23 °C + 15 h při 80 °C		G R C Skelné vlákno G F K	C R C Uhlík. vlákno C F K	S R C Kevlar.vlákno S F K
Pevnost v ohybu 10 <sup>3</sup>	psi x	74 - 81 510 - 560	104 - 112 720 - 770	51 - 55 350 - 380
	N/mm <sup>2</sup>			
Pevnost v tahu 10 <sup>3</sup>	psi x	67-73 460 - 500	74 - 80 510 - 550	58 - 70 400 - 480
	N/mm <sup>2</sup>			
Pevnost v tlaku 10 <sup>3</sup>	psi x	59 - 64 410 - 440	67 - 74 460 - 510	20 - 23 140 - 160
	N/mm <sup>2</sup>			
Pevnost ve střihu 10 <sup>3</sup>	psi x	6,1 - 6,7 42 - 46	6,8 - 8,0 47 - 55	4,2 - 4,9 29 - 34
	N/mm <sup>2</sup>			
Modulus pružnosti 10 <sup>3</sup>	psi x	2,9 - 3,5 20 - 24	5,8 - 6,5 40 - 45	2,3 - 2,8 16 - 19
	N/mm <sup>2</sup>			
GRC vzorky: 16 vrstev skelné tkaniny, 8 H satén, 296 g/m <sup>2</sup> , 4 mm silné CRC vzorky: 8 vrstev uhlíkové tkaniny, plátno, 200 g/m <sup>2</sup> , 2 mm silné SRC vzorky: 15 vrstev kevlarové tkaniny, 4H satén, 170 g/m <sup>2</sup> , 4 mm silné  Obsah vláken ve vzorcích během výroby/testování: 40 - 45 vol% Data propočítaná na obsah vláken 43 vol%  Typická data dle WL 5.3203 Části 1 a 2 Manuálu o německých leteckých materiálech.				

## Míchací poměry

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

### Gel time

- nános do vrstvy 1 mm při různých teplotách

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

### Mechanická data nezesílené pryskyřice

Hustota	g/cm <sup>3</sup>	1,18 - 1,20
Pevnost v ohybu	psi x 10 <sup>3</sup> N/ mm <sup>2</sup>	16 - 18 110 - 120
Modul pružnosti	psi x 10 <sup>5</sup> kN/mm <sup>2</sup>	4,6 - 4,8 3,0 - 3,3
Pevnost v tahu	psi x 10 <sup>3</sup> kN/mm <sup>2</sup>	10 - 11,5 70 - 80
Pevnost v tlaku	psi x 10 <sup>3</sup> kN/mm <sup>2</sup>	18 - 20 120 - 140
Průtažnost	%	5 - 6,5
Síla nárazu		45 - 55
Nmm/mm <sup>2</sup>		
Pevnost ve stříhu	D	80 - 85
Absorpce vody %	24 h 23 °C 7 d/ 23 °C	0,20 - 0,30 0,60 - 0,80
Odolnost proti únavě pod tlakem na obrácený ohyb dle DLR Brunsw. 90 %	10 %	2 X 10 <sup>4</sup> 2 X 10 <sup>6</sup>
Vytvrzení:	24 h při 23 °C + 15 h při 60 °C	
Typická data dle WL 5.3203 Části 1 a 2 Manuálu o německých leteckých materiálech		

# PŘÍLOHA P II: MATERIÁLOVÝ LIST SKELNÁ TKANINA 280 G/M<sup>2</sup>

## TECHNICKÝ LIST

Podniková norma 2005	Sklovláknité tkaniny typu T
Technický list č. 10	Schválen 29.05.2000
Název T 280 PLÁTNO, KEPR 2/2	

Technické parametry		
<b>1. Použitý materiál (tex):</b>		
Osnova:	204	(viz. technický list výrobce)
Útek:	204	(viz. technický list výrobce)
<b>2. Dostava na 10 cm:</b>		
Osnova (+3%)	70	ČSN EN 1049-2 (800814)
Útek (+3%)	68	
<b>3. Vazba:</b>		
	plátno	
<b>4. Standardní šíře (jednotl. cm. +2%)</b>		
	dle požadavků zákazníka	
	ČSN EN 1773 (800843)	
<b>5. Délka role (jednotl. m. max. +2%)</b>		
	dle požadavku zákazníka	
	ČSN EN 1773 (800843)	
<b>6. Plošná hmotnost (prům., g/m<sup>2</sup>, +3%)</b>		
	280	ČSN 800845
<b>7. Obsah spalitelných látek (prům. % hmotnosti, max.)</b>		
	0,80	ON 800680
<b>8. Tloušťka (prům.hodnota,mm)</b>		
	0,33	ČSN EN ISO 5084 (800844)
<b>9. Pevnost (prům., N/5cm, min.)</b>		
Osnova:	2323	ČSN EN ISO 13 943-1 (800812)
Útek:	2049	ČSN EN ISO 13 934-1 (800812)
<b>10. Kraje:</b>		
	stříhané	
<b>11. Balení:</b> Tkaniny jsou uloženy jednotlivě na dřevěnou paletu. Baleny do igelitové fólie, kartonu a jsou zabezpečeny proti posunu páskou.		
<b>12. Skladování:</b> Zabalené role tkanin je třeba skladovat tak, aby na tkaninu z venku nepůsobil žádný tlak. Teplota skladování je -10°C až +50°C.		



HAVEL COMPOSITES CZ s.r.o.  
 8véčedíloe 87  
 783 64 Pfaclavíloe  
 tel.: +420 686 128 011  
 fax: +420 686 128 040  
 info@havel-composites.com  
 www.havel-composites.com  
 IČ: 26807378  
 DIČ: CZ26807378

## AEROGLASS GLASS FABRICS

Weave	Density (ends/cm)		Firm (Tov)		Fabric Width (mm)	Fabric Weight (0.9M)	Standard Weight (0.9M)	Tensile Strength (N/25mm)		Moisture Content (%)	Loss on Ignition (%)
	0°(Warp)	90°(Weft)	0°(Warp)	90°(Weft)				0°(Warp)	90°(Weft)		
Plain	16	15	33	33	1000	110	110 ± 10	400	400	0-0.2	0.3-0.8
Twill	16	15	33	33	1000	110	110 ± 10	400	400	0-0.2	0.3-0.8
Twill	16	13	66	66	1000	200	200 ± 20	900	700	0-0.2	0.3-0.8
Plain	8	7	99	99	1000	140	140 ± 11	600	600	0-0.2	0.3-0.8
Plain	12	12	66	66	1000	190	190 ± 12	700	650	0-0.2	0.3-0.8
Twill	12	12	66	66	1000	190	190 ± 12	700	650	0-0.2	0.3-0.8
Plain	8	7	132	132	1000	200	200 ± 16	650	550	0-0.2	0.3-0.8
Plain	8	5	200	200	1000	220	220 ± 18	650	550	0-0.2	0.3-0.8
Plain	8	7	290	290	1000	280	280 ± 24	1000	800	0-0.2	0.3-0.8
Twill	8	7	290	290	1000	280	280 ± 24	1000	800	0-0.2	0.3-0.8
Plain	8	7	264	264	1000	330	330 ± 32	1200	1100	0-0.2	0.3-0.8
Twill	8	7	264	264	1000	330	330 ± 32	1200	1100	0-0.2	0.3-0.8
Twill	6	6	330	330	1000	390	390 ± 32	1200	1100	0-0.2	0.3-0.8
Plain	2.9	2.9	600	600	1000	350	350 ± 28	2200	2000	0-0.2	0.3-0.8
Plain	3.2	4	800	800	1000	450	450 ± 36	2700	2400	0-0.2	0.3-0.8

### Note for the reader

Havel Composites CZ s.r.o. (Havel) was convinced of the accuracy of the Information provided at the time this material was prepared, or the information was taken from sources that the company believed to be reliable; however, the user is responsible for studying and understanding other relevant sources of information in such a way as to comply with all laws and procedures applicable to the safe handling and handling of the product and to determine the suitability of the product for its intended use. For all products supplied by Havel, Havel's sales terms and conditions apply. THE COMPANY MAKES NO WARRANTY, WHETHER EXPRESS OR IMPLIED, TO ANY PRODUCT OR ITS MERCHANTABILITY OR FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE. HAVEL MAKES NO WARRANTY CONCERNING THE ACCURACY OF ANY INFORMATION CONTAINED BY HAVEL, except that its products will be in conformity with Havel's technical specifications. The information provided here does not constitute an offer for the sale of any product.

Zpracoval: Ing. Richard Moravec

Dne: 1.3.2019

# PŘÍLOHA P III: MATERIÁLOVÝ LIST UHLÍKOVÁ TKANINA 200 G/M<sup>2</sup>



## Inspection Certificate 3.1 EN 10 201: 2004

Certificate No.: **C0173101**

Material Code: AKS000101  
Material Description: **CCA 200 P - 100 Industry**  
Manufacturing Date: 31.8.2019  
Article no.: CA0063-041-0001  
Test roll No.: C0173101  
Finish: Isostate  
Kind of material - warp: AKS 3K 200 Tex  
Kind of material - weft: AKS 3K 200 Tex  
Compatibility: epoxid, vinyl ester  
Binding: plain

Results of specific tests according to Specification No.:		AKS000101				
Characteristic	Unit	Target value	Tolerance (min. - max.)		Test results	Note
Sort of warp	n/m	900	400	510	* 900	DIN EN 1049-2
Sort of weft	n/m	900	400	510	* 900	DIN EN 1049-2
Thickness	mm	0.32	0.27	0.37	* 0.33	DIN EN 5094
Area weight	g/m <sup>2</sup>	200	190	210	202	DIN EN 12127
Width	cm	100	99	101	* 100.0	DIN EN 1773
Density AKS 3K 200 Tex	g/cm <sup>3</sup>	1.78			*	

\* orientation vzduch

Corresponds to the batch no.: C01731



Address of Manufacturer:  
KORDÁRNA /Tux s.r.o.  
626 74 Velká nad Veličkou 650  
Czech Republic

Contact of Trade Desk: Korderna JRF, +420 518 312 528  
+420 518 329 302, korderna@korderna.cz

# PŘÍLOHA IV: MATERIÁLOVÝ LIST DELTAPREG VV430U – DT860W-39

Versatile Low Viscosity  
Epoxy Matrices

**DT806 Resins**

## DT806 Group of Resins

The following are the resins offered within this group:

Resin	Description	Application
DT806R	Low viscosity, unpigmented resin	Fabric (solvent) and UD (hot-melt) prepregs
DT806W	Higher tack version of DT806R	Usually for fabric (solvent) prepregs.

## DT806 Resin Matrix Properties

Chemical nature	Epoxy Thermosetting Resins
Curing Temperature range	65 to 140°C
Density of cured neat resin	1.21 g/cm <sup>3</sup> (DT806R)
Dynamic viscosity	Low, < 300 Poise @ 60°C, frequency 10 rad/sec, for DT806R and DT806W.
Gel Times (ASTM D 3532), For all DT806 resins.	50 to 60 minutes @ 80°C 15 to 19 minutes @ 100°C 4 to 6 minutes @ 120°C 2 to 3 minutes @ 130°C

The following charts show the rheological behaviour of DT806R and DT806W

Firstly, a dynamic viscosity profile for these two resins.

Followed by Figure 1 giving isothermal viscosity profiles for DT806R.

## Thermal Performance of DT806R Laminates

All resins in the DT806 group have very similar thermal performance and have the same recommended cure cycles. The following table indicates the typical glass transition temperature (T<sub>g</sub>) developed by DT806R laminates.

Cure Cycle	T <sub>g</sub> (°C)
16 Hrs @ 65°C	70 to 80
5 Hrs @ 80°C	90 to 100
1.5 Hrs @ 100°C	110 to 120
1 Hr @ 120°C	120 to 130

Note: The Tangent Modulus Intercept T<sub>g</sub> values have been measured by DMA, according ASTM D7028.

# PŘÍLOHA V: SEPARAČNÍ VOSK HAVEL WAX 60- X3



Havel Composites CZ, s.r.o.,  
Svědlice 67, Píslavice, 783 54  
Tel.: 585 129 010, Fax 585 129 040,  
[www.havel-composites.cz](http://www.havel-composites.cz)  
[info@havel-compositec.cz](mailto:info@havel-compositec.cz)

## Technický list Havel Wax 60-x3

### POPIS PRODUKTU:

Univerzální separační voskový prostředek ve formě pasty pro zpracovávání polyesterové a epoxidové pryskyřice.

Vhodný pro modely, nové nástroje a kontinuální výrobu.

Umožňuje u zaběhnutých nástrojů vícenásobné odformování při teplotách až 140°C.

### POUŽITÍ:

Pro nanášení separačního voskového prostředku Havel Wax 60-x3 se používá čistá, měkká baviněná látka.

Voskový separační prostředek se touto bavněnou látkou velkoryse nanese na přehledové plochy a potom se vyleští čistou látkou do vysokého lesku.

Nové formy vyžadují nanášení čtyř až šesti vrstev vosku, přičemž se musí před každým novým nanášením počkat, až se podíly rozpouštědla odpaří.

[Jako dodatečné bezpečnostní opatření doporučujeme pro první odformování nanést separační film polyvinylalkoholu (PVA).]

**Doporučení: Nové formy je nutné zásadně temperovat.**

**Upozornění:** Navzdory rychlému vyleštění nanášené vrstvy zůstává film vosku pouze zcela na povrchu formy bez toho, aby do struktury formy pronikla. Díky exotermickému vývinu tepla, ke kterému dochází během prvních odformování, je separační voskový prostředek postupně stále více vháněn do povrchových pórů materiálu formy, až je dosaženo takzvaného „voskem nasyceného“ stavu formy. Jako přibližné pravidlo pro dosažení požadovaného stavu platí 4-8 odformování. Jako dodatečné zabezpečení proti lepení výrobků ve formě nebo uvíznutí výrobků ve formě se doporučuje během tohoto „kondicionování“ formy nanést separační film polyvinylalkoholu (PVA), který je možné, pokud je to nutné, snadno rozpustit pomocí teplé vody. Jestliže je tímto způsobem čistě „zaběhnuta“ nová forma, tak je možné pomocí přípravku Havel Wax 60-x3 dosahovat velmi dobrých výsledků co se týče počtu možných oddělení.

**Nové formy musí být zásadně temperovány při 50 °C po dobu minimálně tří hodin než se začne s nanášením separačního prostředku.**

### FYZIKÁLNÍ VLASTNOSTI: (při 25 °C)

Hmotnost na litr	0,839 kg
Bod vzplanutí	43 °C
Spodní hodnota výbušnosti	0,8 obj. %
Hodnota MAK	500 ppm
Podíl rozpouštědla	cca. 80 %
Forma dodávky	dóza 450 g