

# **Faktory ovlivňující únavovou životnost konstrukčních kompozitů**

Bc. Zbyněk Krejčířík

---

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. Zbyněk Krejčířík**  
Osobní číslo: **T18707**  
Studijní program: **N3909 Procesní inženýrství**  
Studijní obor: **Konstrukce technologických zařízení**  
Forma studia: **prezenční**

Téma práce: **Faktory ovlivňující únavovou životnost konstrukčních kompozitů**

Zásady pro vypracování:

1. vypracování rešerše pro danou oblast
2. výroba zk.těles
3. provedení zkoušek únavy
4. vyhodnocení výsledků z hlediska konstrukčních aplikací

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

Seznam odborné literatury:

1. KRÁL, M.:Únava vlákný vyztužených kompozitů s polymerní matricí [online]. Praha, 2014 [cit. 2016-04-28]. Prezentace. Výzkumný a zkušební letecký ústav, a.s. Útvar kompozitní technologie. Dostupné z:[http://www.csm-kompozity.wz.cz/Prezentace\\_UTAM.pdf](http://www.csm-kompozity.wz.cz/Prezentace_UTAM.pdf)
2. Růžička, M., Hanke, M. a Rost, M.: Dynamická pevnost a životnost. Praha: Nakladatelství ČVUT, 1987, 212 s.
3. RŮŽIČKA, M., FIDRANSKÝ, J. :Pevnost a životnost letadel. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2000. ISBN 80-01-02254-4.

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*

Příjmení a jméno: .....

Obor: .....

## 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, považuji se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Ve Zlíně .....

<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 nevyjádřeně zveřejňuje disertační, diplomové, bakalářské a rigorózní práce, u kterých proběhla obhajoba, včetně pasáží 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 nahlédnutí 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) Da 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 díla).

<sup>11</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 díla:

(1) Škola nebo školské či vzdělávací zařízení mají za obvyklých podmínek právo na uzavření licenční smlouvy a 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 výděliku 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 přihlídí k výši výděliku dosaženého školou nebo školským či vzdělávacím zařízením z užití školního díla podle odstavce 1.

## **ABSTRAKT**

Diplomová práce pojednává o únavovém chování konstrukčních kompozitů a faktorům, které ovlivňují jak mechanické, tak dynamické vlastnosti těchto materiálů. Teoretická část je především zaměřena na obecný popis jednotlivých složek kompozitních materiálů, únavovém chování a způsobu, jak jej lze měřit. V poslední kapitole je rozebrána problematika faktorů, které toto chování ovlivňuje. V praktické části jsou popsány experimentální zjištění mechanických a dynamických vlastností na jednotlivých typech zkušebních vzorků. Mechanické vlastnosti byly analyzovány zkouškou tříbodového ohybu a v tahu, dynamická zkouška pak probíhala v tahu.

Klíčová slova: polymery, kompozity, prepreg, únava kompozitních materiálů, dynamické namáhání, UD Deltapreg VV430U,

## **ABSTRACT**

The diploma thesis deals with fatigue behavior of structural composites and factors that influence mechanical and dynamic properties of these materials. The theoretical part is mainly focused on the general description and individual components of composite materials, stress behavior and the way it can be measured. In the last chapter is discussed the issues of factors influencing this behavior. The practical part then describes the experimental determination of mechanical and dynamic properties on individual types of test samples. The mechanical properties were analyzed by a three-point bending and tensile test, and the dynamic test was tensile.

Keywords: polymers, composites, prepreg, fatigue of composite materials, dynamic stress, UD Deltapreg VV430U

Touto cestou bych rád poděkoval vedoucímu mé práce Ing. Milanu Žaludkovi Ph.D. za odborné vedení, cenné rady, trpělivost, ochotu a vynaložený čas, který mi věnoval po dobu tvorby této diplomové práce. Taktéž bych chtěl poděkovat Ing. Alexanderu Čapkovi při pomoci a realizaci únavových zkoušek. V neposlední řadě bych chtěl poděkovat své rodině a nejbližším za jejich podporu a pomoc v průběhu celého studia.

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

# OBSAH

ÚVOD.....	10
<b>I TEORETICKÁ ČÁST.....</b>	<b>11</b>
<b>1 KOMPOZITNÍ MATERIÁLY .....</b>	<b>12</b>
1.1 HISTORICKÝ POKROK A UPLATNĚNÍ V PRŮMYSLVÝCH ODVĚTVÍCH .....	14
1.2 ROZDĚLENÍ KOMPOZITŮ .....	14
1.3 MATRICE .....	15
1.3.1 Reaktoplasty .....	16
1.3.1.1 Epoxidové pryskyřice .....	17
1.3.1.2 Polyesterové pryskyřice .....	18
1.3.1.3 Fenolové pryskyřice.....	18
1.3.1.4 Vinylesterové pryskyřice .....	18
1.3.1.5 Technologie Prepreg .....	19
1.3.2 Termoplasty.....	20
1.3.2.1 PEEK .....	20
1.3.2.2 PEAK.....	21
1.3.3 Kovy.....	21
1.3.4 Keramika .....	21
1.4 VÝZTUŽ.....	22
1.4.1 Skelná vlákna .....	23
1.4.2 Uhlíková vlákna .....	25
1.4.3 Aramidová vlákna .....	26
1.4.4 Bórová vlákna .....	27
1.4.5 Ostatní .....	27
1.5 MECHANICKÉ VLASTNOSTI KOMPOZITŮ .....	28
1.5.1 Druhy zkoušek mechanických vlastností .....	29
<b>2 ÚNAVA MATERIÁLU.....</b>	<b>30</b>
2.1 ÚNAVOVÉ POŠKOZENÍ KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ .....	31
2.1.1 Fáze poškození .....	31
2.2 ÚNAVOVÁ ZKOUŠKA .....	33
2.2.1 Typy zatížení .....	33
2.2.2 Frekvence při zkoušce .....	34
2.2.3 Průběh zatěžování .....	34
2.3 KŘIVKY ÚNAVOVÉHO ZATĚŽOVÁNÍ.....	35
2.3.1 Křivka životnosti $\epsilon A - Nf$ .....	35
2.3.2 Wöhlerova křivka.....	36
2.3.2.1 Zatěžovací cyklus .....	37
2.3.2.2 Oblasti Wöhlerovy křivky .....	37
<b>3 FAKTORY OVLIVŇUJÍCÍ ÚNAVOVÉ CHOVÁNÍ A ŽIVOTNOST.....</b>	<b>39</b>
3.1 VLIV SKLÁDÁNÍ VRSTEV .....	39
3.2 DEGRADAČNÍ PROCESY .....	41
3.2.1 Termodegradace .....	41
3.2.2 Fotodegradace .....	42



3.2.3	Mechanická degradace .....	42
3.2.4	Změny nadmolekulární struktury .....	42
<b>II</b>	<b>PRAKTICKÁ ČÁST .....</b>	<b>44</b>
<b>4</b>	<b>VÝROBA ZKUŠEBNÍCH TĚLES .....</b>	<b>45</b>
4.1	POSTUP VÝROBY .....	45
4.1.1	Příprava před lisováním .....	45
4.1.2	Podmínky při lisování .....	47
4.2	PŘÍPRAVA ZKUŠEBNÍCH TĚLES K MĚŘENÍ .....	47
4.2.1	Použitý materiál .....	48
4.2.2	Modifikace vrstvení prepregů .....	48
4.2.3	Řezání zkušebních těles .....	51
4.2.3.1	Řezání materiálu vysokotlakým vodním paprskem.....	51
<b>5</b>	<b>EXPERIMENTÁLNÍ ZJIŠTĚNÍ MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ .....</b>	<b>53</b>
5.1	STATICKÁ ZKOUŠKA OHYBEM .....	53
5.1.1	Vzorek č.1 .....	55
5.1.2	Vzorek č.2 .....	56
5.1.3	Vzorek č.3 .....	57
5.1.4	Vzorek č.4 .....	58
5.1.5	Porovnání mechanických vlastností vzorků č.1, č.2, č.3 a č.4 v ohybu .....	59
5.1.6	Shrnutí mechanických vlastností v ohybu.....	61
5.2	STATICKÁ ZKOUŠKA TAHEM.....	61
5.2.1	Vzorek č.5 .....	62
5.2.2	Vzorek č.6 .....	63
5.2.3	Vzorek k porovnání mechanických a dynamických vlastností pro vzorky č.5 a vzorky č.6 .....	64
5.2.4	Porovnání mechanických vlastností vzorků č.5, č.6 a vzorků k porovnání v tahu.....	66
5.2.5	Shrnutí mechanických vlastností v tahu.....	68
<b>6</b>	<b>EXPERIMENTÁLNÍ ZJIŠTĚNÍ DYNAMICKÉHO NAMÁHÁNÍ.....</b>	<b>69</b>
6.1	PARAMETRY ZKOUŠKY .....	69
6.2	DYNAMICKÁ ZKOUŠKA TAHEM.....	70
6.2.1	Vzorek č.5 .....	70
6.2.2	Vzorek č.6 .....	71
6.2.3	Vzorek k porovnání.....	71
6.3	POROVNÁNÍ JEDNOTLIVÝCH ZKUŠEBNÍCH VZORKŮ .....	72
6.3.1	Shrnutí dynamických vlastností v tahu .....	74
	<b>ZÁVĚR .....</b>	<b>75</b>
	<b>SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....</b>	<b>77</b>
	<b>SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....</b>	<b>81</b>
	<b>SEZNAM OBRÁZKŮ .....</b>	<b>83</b>
	<b>SEZNAM TABULEK.....</b>	<b>85</b>
	<b>SEZNAM PŘÍLOH.....</b>	<b>86</b>

## ÚVOD

Rychlý a dynamicky rozvíjející se strojný průmysl se v posledních letech zaměřuje především na rozvoj výroby a zpracování plastů, a tak předstihuje rozvoj většiny jiných oborů. Mezi typy zpracování polymerů určitě najdeme výrobu kompozitních materiálů, což je systém složek, který je vzájemně propojen. Tímto propojením získává výsledný výrobek daleko lepší vlastnosti, které by samotné složky nebyly nikdy schopny dosáhnout. Díky vlastnostem, jako jsou velká pevnost na poměry jeho plošné hmotnosti, tepelné odolnosti, tlumení rázů ale i dielektrickým vlastnostem je kompozitní materiál velmi rozšířen v průmyslových odvětvích, mezi které patří průmysl automobilový, lodní a především letecký.

Hlavním aspektem této diplomové práce je studium únavového chování kompozitního materiálu a jeho vlastnostech při dynamickém zatížení. V teoretické části je vysvětleno rozdělení kompozitních materiálů, stejně jako popis jednotlivých složek kompozitního systému včetně mechanických vlastností. V další části je popsána únava materiálů a následné únavové chování při zatěžování, kde jsou součástí této kapitoly vysvětleny i křivky únavového zatěžování. Poslední část teoretické práce se pak zabývá faktory, které ovlivňují míru únavy a životnost konstrukčních kompozitů. Praktická část zahrnuje popisy jednotlivých úkonů, kterými jsou výroba zkušebních těles, následné měření a srovnání mechanických a únavových vlastností těchto těles s ohledem ve změně vrstvení. Cílem je určit, zda vrstvení s překlady vykazuje značný vliv na výsledné vlastnosti daného prepregu.

## **I. TEORETICKÁ ČÁST**

## 1 KOMPOZITNÍ MATERIÁLY

Kompozitní materiál je druh vícefázového materiálu, získaný cílenou kombinací odlišných materiálů za účelem nabytí vlastností, které jednotlivé komponenty nejsou schopny samostatně dosáhnout. Jedná se o kombinaci fyzikálních, chemických a mechanických atributů. Z hlediska struktury rozdělujeme jednotlivé komponenty podle účelu v daném kompozitu na matici a výztuž. Výztuž může být tvořena uhlíkem, skleněným materiálem, aramidem apod. Výztužné fáze jsou velmi odolné, a jejich účelem je zajistit pevnost a tvrdost kompozitu. Účelem matrice je stmelovat a chránit výztuž vůči chemickým vlivům a vlivům okolního prostředí, přenášet zatížení mezi vlákny a vytvářet výsledný profil. Kompozity, na rozdíl od kovů a keramiky, jsou častokrát anizotropní materiály, což znamená, že jejich fyzikální vlastnosti jsou závislé na směru, ve kterém jsou měřeny. Tyto vlastnosti umožňují návrhářům efektivně využít materiál pro různé konstrukční zatížení. Z celé škály kompozitních materiálů patří mezi nejrozšířenější kompozity s maticí tvořenou polymery. Mezi jejich klíčové atributy patří méně náročná výroba a recyklace, ve srovnání s kovy a keramikou, v neposlední řadě i odolnost vůči korozi. Dominantní vlastnost, díky které je řadíme mezi tzv. progresivní konstrukční materiály, je vysoká hodnota specifické pevnosti.

[1]

Tab. 1 Srovnání pevnostních charakteristik kovů a polymerních kompozitních materiálů

Materiál	Průměrná hustota (g/cm <sup>3</sup> )	Pevnost (MPa)	Specifická pevnost (MPa.cm <sup>3</sup> /g)	Normalizovaná pevnost
PP/ Skelná vlákna	1,48	720	486	1
Ocel	7,8	286-500	36-64	0,07-0,13
Slitiny mědi	8,3	60-960	7-116	0,01-0,24
Hliník	2,6	40	15	0,03

Vlastnosti kompozitů určují:

- vlastnosti jednotlivých složek (matrice a výztuže)
- vzájemný podíl jednotlivých složek
- geometrie výztuže (může být ve formě částic, vláken, lamel)
- typem rozhraní mezi maticí a výztuží (čisté rozhraní, rozhraní s mezifázové přítomností)

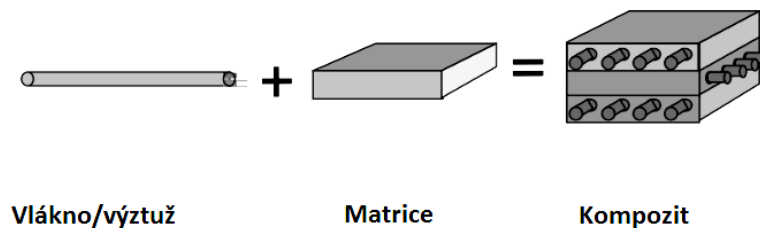
Znaky, které vykazují jednotlivé kompozity, lze do značné míry modifikovat pro potřeby jednotlivých aplikací, proto není možné generalizovat jejich charakteristiky. Přesto je možnost vyzvednout několik pozitivních a negativních vlastností. [4]

Výhody kompozitů:

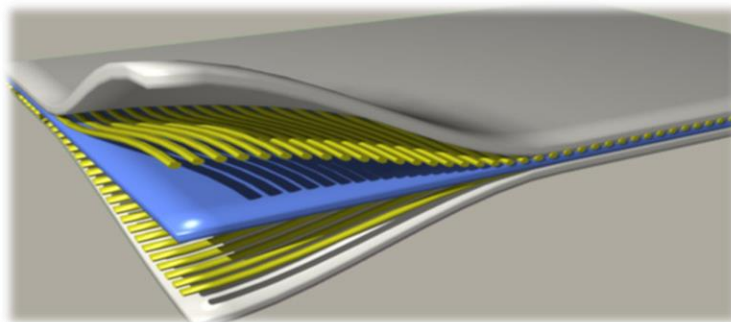
- nízká hmotnost (oproti kovovým materiálům)
- příznivý poměr pevnosti a hmotnosti (pevné a lehké zároveň)
- odolnost vůči korozi
- schopnost absorbovat nárazy
- flexibilita tvarování
- trvanlivost

Nevýhody kompozitů:

- méně předvídatelné chování materiálu
- sledování struktury a nedestruktivní kontrola je složitější než v případě kovů
- výrobní náklady



Obr. 1 Skladba kompozitního materiálu[8].



Obr. 2 Kompozitní materiál[8].

## 1.1 Historický pokrok a uplatnění v průmyslových odvětvích

Přestože kompozity v různých podobách jsou lidstvu známy již od nepaměti, s ideou využití kompozitů jako konstrukčního materiálu přišel v roce 1916 R. Kemp. Myšlenka pojednávala o vizi sestrojení letadla tvořeného téměř výhradně z vyztužených plastů. K prvním experimentům a prudkému vývoji došlo v 40. letech 19. století. Hnacím elementem pokroku byla II. světová válka a nově vzniklé potřeby armády. Na automobilový a letecký průmysl byly kladeny požadavky k výrobě vysokopevnostních a zároveň lehkých materiálů. U letadel a helikoptér nastával problém s nosností – čím vyšší váha stroje, tím méně nákladu byl schopen unést. Klíčem k úspěchu bylo použití skelných vláken, které v té době průmysl dokázal vyrobit. Průkopníkem se stala americká společnost Owens- Corning, která začala s masovou produkcí. O několik let se práva na využití jejich patentů dostala i do Evropy s vidinou dalšího růstu. Šedesátá léta přišli s novými požadavky pro rozvíjející se vojenské vesmírné programy. Sovětský Sputnik potřeboval materiál, který by odolal teplotám překračujících 1500 ° C a byl ještě lehčí a pevnější než kompozity se skelnými vlákny. Řešením se měl stát kompozit s kovovou maticí, avšak ani ten neměl predispozice odolat tak extrémním podmínkám. Aplikace kompozitů v období od poválečné éry až po současnost bylo možné sledovat primárně ve sportovním odvětví, kde původně ocelové golfové hole a dřevěné tenisové rakety byly nahrazeny pokročilejšími materiály. Rovněž probíhaly změny i v leteckém průmyslu – použití prioritně u křídel a trupů letadel. V současnosti nacházejí uplatnění například v počítačových komponentech (nanokompozity), zubním lékařství atd. [1, 6, 7, 8]

## 1.2 Rozdělení kompozitů

Kompozitní materiály lze rozčlenit do několika podskupin a to na základě: typu matrice, geometrie vyztužujících vláken a dle metody přípravy.

Podle typu matrice:

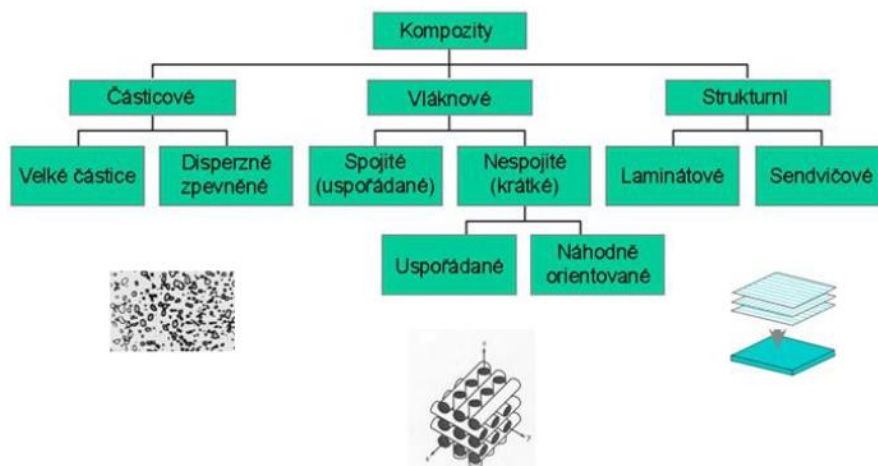
- s maticí tvořenou kovy
- s maticí tvořenou polymery
- s maticí tvořenou keramikou
- s maticí tvořenou uhlíkem

Podle geometrie vyztužujících vláken:

- částicové
- vláknové s dlouhými vlákny
- vláknové s krátkými vlákny, whiskery
- vrstvené (lamináty, sendviče)

Podle druhu plniva:

- kompozity s anorganickými plnivými (skleněné, keramické, kovové vlákna)
- kompozity s organickými plnivými (uhlíkové, aramidová vlákna) [2, 4]



Obr. 3 Rozdělení kompozitních materiálů [9].

### 1.3 Matrice

Matrice je spojitá složka kompozitního materiálu, která spojuje a chrání křehká vlákna vyztuže, zajišťuje geometrické uspořádání, zabezpečuje boční oporu vláken a distribuci zatížení na vlákna. Zásadně má nižší pevnost v tahu než vlákna, v některých případech až o dva řády. Oproti vláknům jsou naopak matrice podstatně poddajnější. [9].

Nejpoužívanějšími maticemi pro uhlíková a skelná vlákna se staly polyesterové, vinylesterové, epoxidové a různé termoplasty. Na náročné aplikace pro vojenský a kosmický průmysl jsou vhodné reaktoplasty a aromatické termoplasty. S maticí je možné pracovat pouze v jejím kapalném stavu. Proto je nutné řídit začátek tuhnutí přidáním vhodného množství ztužující složky do pryskyřice. Matrice se liší především teplotou zpracování a

jejich fyzikálními vlastnostmi při teplotě zpracování. U jiných než uhlíkových a skelných vláken mohou být použity i keramické nebo kovové matrice. V následující tabulce je uvedeno porovnání teplot zpracování a teplot skelného přechodu pro běžně používané matrice [1], [12].

Tab. 2 Porovnání teplot zpracování a skelného přechodu u různých pryskyřic

Matrice	$t_z$ [°C]	$t_g$ [°C]
Nevyztužená nenasyčená polyesterová pryskyřice vytvrzená za studena	10 až 40	90-150
Nenasycená polyesterová pryskyřice vytvrzená za tepla	≈140	90-150
Nevyztužená epoxidová pryskyřice vytvrzená za tepla	Např. 130	75-135
Polypropylen	200 až 270	-10/100
Polyéterketón	≈350 až 400	143

Hlavní podmínkou pro požadovanou kvalitu kompozitu je dostatečné smáčení všech vláken a výsledný materiál bez bublin. Proto je třeba použít dostatečné množství pryskyřice. Stává se že i v případě dostatečného množství pryskyřice může dojít k chybám a kazům ve výsledném kompozitu. Nejčastěji se ve výrobě řeší problémy s nízkou adhezí na rozhraní matrice-vlákno. Tyto problémy se řeší vhodnou apretací pro konkrétní typ vlákna a zvolení správné matrice s tužidlem. V závislosti na velikosti vyráběné součásti volíme matrici s vhodnou dobou vytvrzení. K dostatečně kvalitnímu sycení výztuže dochází pouze při kapalném stavu matrice, po přechodu do gelového stavu je už nepoužitelná [1], [9].

Kromě mechanických vlastností zajišťuje matrice i chemickou a tepelnou stálost. Častokrát bývá právě matrice limitující složkou v konstrukci kompozitních dílů do extrémních podmínek, protože je zodpovědná za celkovou soudržnost výrobku [9].

### 1.3.1 Reaktoplasty

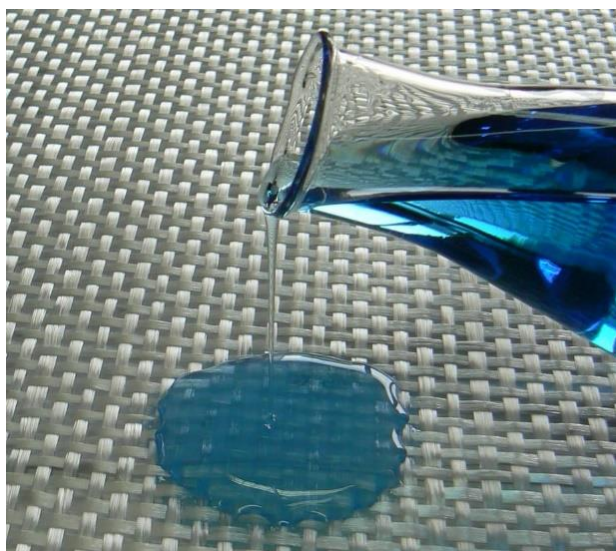
Materiály patřící mezi amorfní polymery, které vytvářejí trojrozměrnou prostorovou síť a po termickém vytvrzení nereagují na teplo, nazýváme reaktoplasty. Jsou nerozpustné v organických



rozpouštědlech, vodě a kyselinách. Po vytvrzení se sice v teplém prostředí neroztají, ale při přílišném zahřátí degradují. Reaktoplasty jsou velmi pevné a tuhé, což je způsobeno síťovou strukturou, která brání rotaci molekul. Zasíťování nastává po určitém čase za účasti zvýšené teploty nebo katalyzátoru. Po tomto procesu je reaktoplast vytvrzen a dále s ním nelze pracovat. Pryskyřice patří do skupiny reaktoplastů: epoxidové, polyesterové, vinylesterové, izokyanátové a další [1,11], [13].

### *1.3.1.1 Epoxidové pryskyřice*

Dlouhou dobu nejpoužívanější pryskyřice na ruční laminování. Oproti polyesteru jsou epoxidy 3x až 4x dražší, ale přinášejí i jisté výhody. Při přípravě pryskyřice jsou používány různé aditiva – ředidla pro snížení viskozity, činidla pro zvýšení flexibility epoxidu a v neposlední řadě katalyzátory urychlující vytvrzování. Epoxidové pryskyřice se po vytvrzení smršťují jen velmi málo, okolo 2 %. To přináší nespornou výhodu ve vzniku pouze velmi nízkých vnitřních napětí, a proto jsou vhodné pro aplikaci i při větších součástech. Mají velmi dobrou smáčivost skelných vláken ve srovnání s polyesterovými pryskyřicemi. Předtím, než je v epoxidové pryskyřici zcela vytvořena síťová struktura, nachází se v mezifázi přimíchání. Tento stav epoxidové pryskyřice je využíván pro výrobu polotovarů, nazývaných Prepreg. Jde o tkaninu napuštěnou pryskyřicí, kde v závislosti na přidaných činidlech se dá s polotovarem dále pracovat [4,11].



*Obr. 4 Tekutá epoxidová pryskyřice[11]*

### *1.3.1.2 Polyesterové pryskyřice*

Nenasycené polyesterové pryskyřice obsahují dvojitě vazby mezi atomy uhlíku. Přidáváním různých aditiv se dají ovlivnit vlastnosti polyesterové pryskyřice. Přidáním kyseliny orthoftalové se zlepšují zpracovatelské vlastnosti a zvyšuje se chemická odolnost, kyselina tetrahydroftalová zvyšuje houževnatost a tepelnou odolnost, kyseliny isoftalová a tereftalová pomáhají odolnosti vůči hydrolyze. Různé přísady nejen vylepšují jisté vlastnosti, ale jsou používány také jako objemové plniva, tedy zvláčňující materiál. Plniva jako křída, kaolin a hydroxid hlinitý zvyšují i viskozitu, což ovlivňuje zpracovatelnost pryskyřice. Polyesterové pryskyřice mají tak jako ostatní reaktoplasty dostatečnou odolnost vůči vodě a chemikáliím, zvětrávání, stárnutí a jsou velmi levné. Smrštění po vytvrzení dosahuje hodnoty mezi 4 % a 8%. Takové smrštění je nežádoucí a je způsobeno nerovnoměrným přechodem do gelového stavu. Z tohoto důvodu vznikají problémy s tvarovou stálostí. Přidáváním plniv a aditiv je možné snížit smrštění na 0,15 až 0,3 %. Jako plnivo jsou použity částice termoplastu, které působením tepla vytvářejí dutiny a tím vyrovnávají smrštění [1].

### *1.3.1.3 Fenolové pryskyřice*

Tyto pryskyřice jsou vyráběny kondenzací fenolů a 30 až 50 % vodných roztoků aldehydů. Existuje množství variant fenolických pryskyřic a liší se podle různých druhů fenolických surovin a různých molárních poměrů fenol / formaldehyd. Pevné fenolové pryskyřice musí vytvrzovat přidáním tvrdidel a za zvýšené teploty, bez tvrdidla mají termoplastické vlastnosti. Vytvrzování probíhá ve dvoustupňové exotermní reakci. Uplatňují se jako pojivo pro izolační materiály, vodovzdorné dřevařské výrobky a brusné nástroje a kotouče. Vyznačují se výbornou chemickou a tepelnou odolností. V běžných vyztužených kompozitech se používají zřídka, protože pro velkoplošné díly jsou příliš křehké a při vytvrzování vznikají těkavé látky [1].

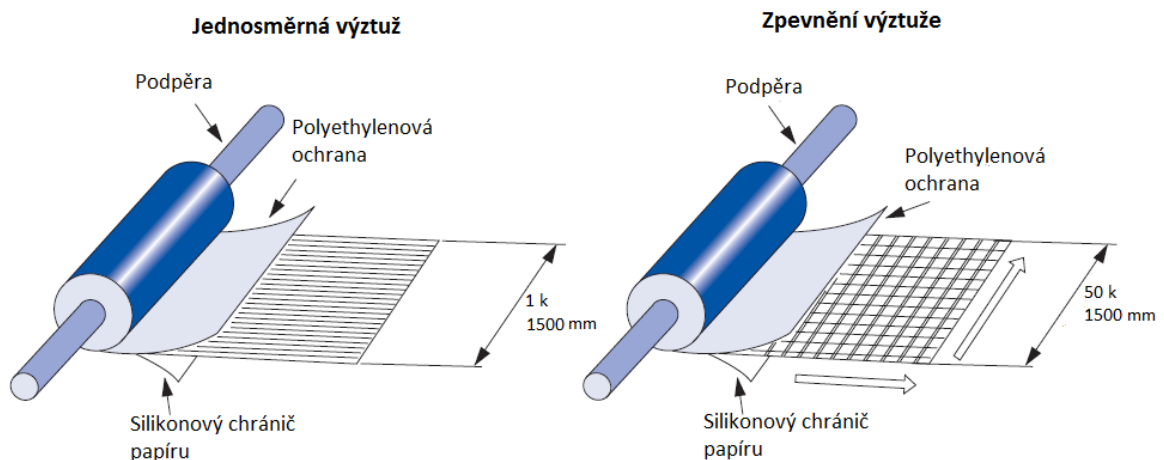
### *1.3.1.4 Vinylesterové pryskyřice*

Mají vysokou houževnatost, jsou velmi dobře odolné proti alkalickým prostředím, avšak mají nižší tvarovou stálost za tepla. Oproti fenolové pryskyřici jsou reaktivnější, odolnější vůči teplotám, ale relativně křehké. Ve srovnání s epoxidovými pryskyřicemi mají nižší viskozitu a vytvrzování je dobře regulovatelné. Jsou vhodné tedy pro použití v prostředích s

vysokým korozním namáháním a v některých aplikacích zcela vytlačily polyesterové pryskyřice. Používají se na velkorozměrné potrubí pro odvod plynu, chladicí věže, stavbu lodí, či při výrobě rotorových listů [1].

### 1.3.1.5 Technologie Prepreg

Pro výrobu kompozitů se často používají předimpregnovaná vlákna tzv. prepregy. Prepreg systémy se nazývají polotovary k výrobě vláknových kompozitů, jejichž hlavní složkou je předimpregnovaná výztuž napuštěná částečně vytvrzenými pryskyřicemi. Prepreg je zkrácený tvar anglického slova *preimpregnated fibres*, což v překladu znamená: „předimpregnovaná vlákna“. Prepregy znázorněné na obr. 5 jsou polotovary plochého tvaru, se speciálně vyvinutou pryskyřičnou matricí, která je vyztužená s umělými vlákny jako například uhlík, sklo a aramid. Tyto systémy se na sebe vrství do požadované tloušťky a ve formách se pak dotvarují a následně se dotvrdí působením tepla a tlaku. K impregnaci prepregů se nejčastěji používají nenasycené polyesterové pryskyřice, vinylové a epoxidové pryskyřice. Výsledný kompozitní materiál je vysoce pevný, teplotně odolný, mimořádně tuhý a extrémně lehký. Jednou z předností prepreg technologie je také jednodušší výrobní proces, kdy je strojově předimpregnována tkanina a vzniká kvalitní produkt s velmi nízkou objemovou hmotností a výbornými mechanickými vlastnostmi. Z prepregů se vyrábí především kompozitní díly pro letectví a kosmonautiku, ale i další průmyslová odvětví včetně větrné energetiky, automobilového průmyslu a sportovního zboží. Známé jsou také technicky náročné produkty jako náběhové a brzdové klapky, kryty komunikačních přístrojů a turbín. Z novějších aplikací je to výroba podmořských trubek pro těžbu ropy a zemního plynu nebo výroba vysokotlakých nádob. [5]



Obr. 5 Varianty výztuže u výroby prepregů [5]

Prepregy s reaktivním termostatickým pojivem musí být skladován za chladu asi  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ , přesto však má tento materiál trvanlivost pouze půl roku (v závislosti na reaktivitě pojiva). Před vlastním zpracováním se musí prepreg rozmrazit, a to nejlépe bez přístupu vzduchu. Poté se z něj připraví přířezy, které nastříháme podle pokládacího plánu, aby byly připraveny na laminaci. Prepregy s termosetickou matricí jsou za pokojové teploty lehce lepivé, což lze zlepšit ohřevem za lehce zvýšených teplot (max.  $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ ). Fixace polohy přířezů bývá často prováděno slabým přitlačením ručním válečkem či teflonovou stěrkou. Pružná a separační fólie se vždy přikládá na povrch výrobku a výrobek se vytvrzuje buď autoklávou, metodou lisování ve vakuu nebo metodou klasického lisování ve vyhřívané formě. Při sériové výrobě je výroba částečně automatizována, kde je prepregový pás pokládán pomocí číslicově řízených strojů, tudíž je výroba reprodukovatelná a z ekonomického pohledu výhodná. [11]

### 1.3.2 Termoplasty

Termoplasty se od reaktoplastů liší řadou rozdílů. Termoplasty jsou za normálních teplot tuhé látky a až po zahřátí převážně nad  $200\text{ }^{\circ}\text{C}$  jsou tekuté. Rovněž jsou podstatně náchylnější na kazy jako reaktoplasty. Toto je způsobeno velkými rozdíly v krystalizaci. Specifickou vlastností oproti reaktoplastům je, že termoplasty lze po zahřátí znovu tvarovat. S možností opětovného zpracování ale přichází riziko zhoršení vlastností, především zhoršením odolnosti vůči nárazu, což je velmi nevýhodné pro letecký průmysl, ve kterém se odolnost vůči nárazům vyžaduje [1].

Oproti reaktoplastům, lineární řetězce molekul dodávají termoplastem vyšší hodnoty meze pevnosti, a to mezi 30 % až 100 %. Tento široký interval je závislý na odchylkách množství krystalizace. Obecně mají termoplasty vyšší viskozitu jako reaktoplasty, ale lze ji kontrolovat úpravou teploty při výrobě. Při zpracování je třeba být však opatrný, protože hrozí degradace matrice. Velkou výhodou pro termoplasty je jejich recyklace. Jsou tak výrazně příznivější pro životní prostředí než reaktoplasty. Jejich degradace může nastat buď za působení vysokých teplot, UV záření nebo absorpcí tekutiny. Absorpce tekutiny v prostředí způsobuje vyvěliny. Z toho vyplývá, že termoplasty jsou náchylnější na vlivy okolního prostředí než reaktoplasty [11].

#### 1.3.2.1 PEEK

Jde o často využívanou termoplastovou matrici především v aloplastice. Vyniká svou odolností vůči únavě a creepu, při dlouhodobém vystavení vlhkému prostředí nenastává

degradace a neškodí mu ani vystavení teplotám až do 260 ° C, krátkodobě i do 300 ° C. Teplota tání Polyéter (éter) ketonu je až 343 ° C. Jde o termoplast s krystalickou strukturou. Taktéž vykazuje vysokou houževnatost jako při lomové zkoušce tak i při rázové zkoušce s padajícím tělesem. Výborné vlastnosti dosáhl i při únavových zkouškách s počtem cyklů 106, což ho předurčuje k použití i pro náhrady v lidské kostře. Materiál vykazuje vysokou odolnost vůči většině běžných rozpouštědel kromě 98 % roztoku kyseliny sírové [14].

### **1.3.2.2 PEAK**

Jde o nástupce materiálu PEEK. Oproti předchůdci dosáhl vyšší tuhost v oblasti od 150 ° C do 190 ° C, zvýšila se chemická odolnost, pevnost a celková tuhost [14].

### **1.3.3 Kovy**

Nejrozšířenějšími kompozity s kovovou maticí jsou kompozity vyztužené částicemi nebo krátkými vlákny, protože jsou cenově dostupné a mají relativně izotropní vlastnosti v porovnání s vláknovými kompozity. Nejčastěji jsou vyztužovány keramickými částicemi jako SiC nebo TiB<sub>2</sub>. Jako matrice se používá množství kovů. Nejčastěji jsou to hliníkové, titanové, hořčíkové a měděné slitiny, případně slitiny kovů. Hliníkové slitiny našly nejlepší využití v leteckém a kosmickém průmyslu, pro které byly i primárně vyvíjeny. Vynikají nízkou hustotou, houževnatostí a odolností vůči korozi. Příkladem může být velmi důležitá slitina Al-Cu-Mg a Al-Zn-Mg-Cu. Slitiny titanu se pro svůj výborný poměr pevnosti a hmotnosti, podobně jako slitiny hliníku, nacházejí v kosmickém a leteckém průmyslu. S bodem tání při teplotě 1672 ° C jsou vhodné pro aplikaci v proudových motorech. I při vysoké teplotě si totiž zachovávají pevnost. Matrice z ostatních kovů jsou využívány méně a většinou jsou hůře opracovatelné. Například kompozity s maticí z hořčíkových slitin se pro svou nízkou hmotnost používají v letectví jako kryty různých mechanismů [11].

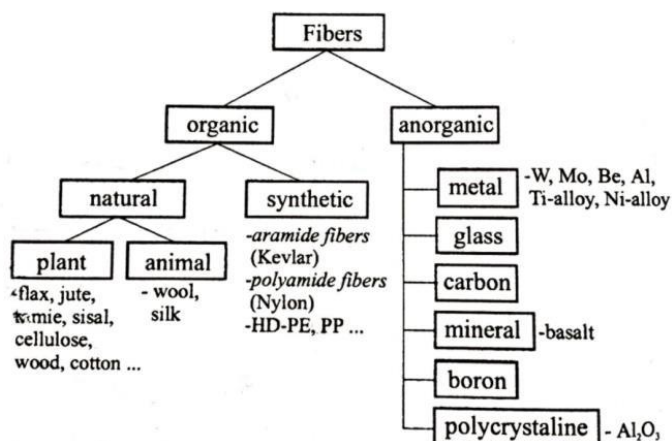
### **1.3.4 Keramika**

Keramické materiály mají vysokou pevnost, tuhost, nízkou hustotu, odolnost při vysokých teplotách a chemických látkách. Zásadní problém při těchto materiálech však nastává při houževnatosti, která prakticky při keramických materiálech neexistuje. Jsou velmi náchylné na teplotní výkyvy a snadno se poškodí při výrobě nebo montáži.

Oproti ostatním kompozitům jsou kompozity s keramickou maticí v některých základních ohledech jiné. Nejzásadnější rozdíl je v rozdělení namáhání v součásti. U ostatních kompozitech nese hlavní namáhání výztuž. Při keramických kompozitech je toto namáhání rozloženo rovnoměrněji mezi maticí a výztuž [11].

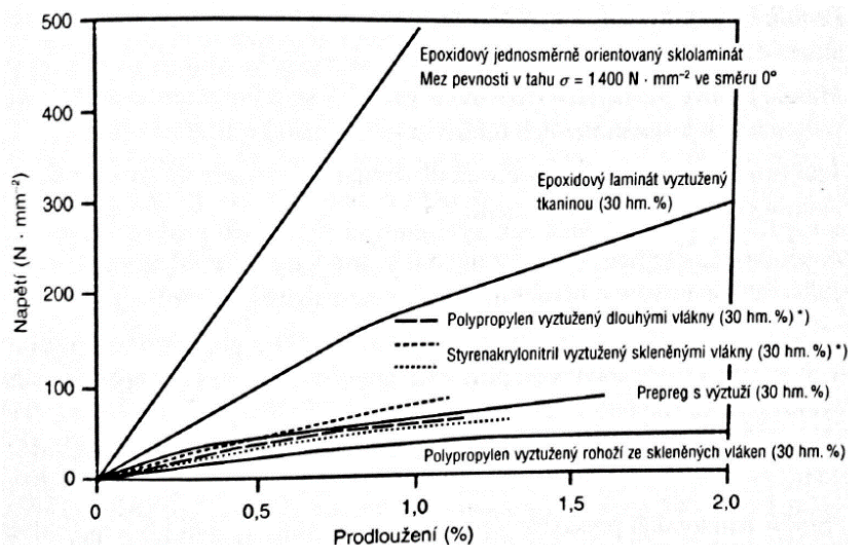
## 1.4 Výztuž

Výztuž je tuhou složkou kompozitních materiálů, která přenáší v součásti hlavní napětí. Základním polotovarem je částice, konečné nebo nekonečné vlákno z materiálu příslušné výztuže. Při výrobě laminátů, které jsou i nejčastější formou vyráběných dílů jsou používány nekonečná vlákna zpracována do několika podob. Materiály výztuže lze dělit do několika skupin. Schematické rozdělení je uvedeno na obrázku 6.



Obr. 6 Rozdělení materiálů výztuží [7]

Samotné vlákno nedokáže přenášet jiné zatížení než rovnoběžné. Pro využití mechanických vlastností vláken se ukládají do různých matic, kde se podle předpokládaného působení zatížení ukládají v různých základních směrech  $0^\circ$ ,  $90^\circ$  a  $\pm 45^\circ$ . Graf závislosti napětí na prodloužení skelných laminátů s různou formou uspořádání výztuže a různou maticí zobrazuje obrázek 7 [1].



Obr. 7 Graf závislosti napětí na prodloužení různých vláknových kompozitů [1]

Důvod, proč jsou používána tenká vlákna namísto robustnějších polotovarů je ten, že pravděpodobnost výskytu fatálních kazů v objemu materiálu je značně nižší. Proto mají například tenká skelná vlákna 20krát vyšší pevnost než tyče z téhož materiálu. Vybrané mechanické vlastnosti některých používaných výztuží jsou v tabulce 3 [15]

Tab. 3 Mechanické vlastnosti používaných vlastností [4]

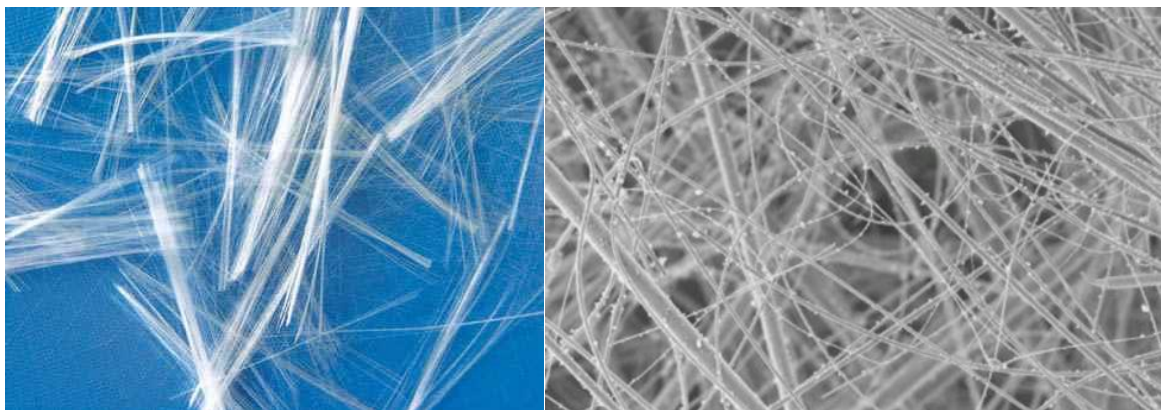
vlákno	$\rho$ [g/cm <sup>3</sup> ]	E [GPa]	$\sigma$ [MPa]	$\varepsilon$ [%]
anorganické:				
azbest	2,56	160	3100	1,9
sklo	2,54	70-85	2200-3500	2,5
borová vl.	2,65	420	3500	0,8
SiC	2,6	250	2200	0,9
uhlík	1,86	300-800	2700	0,7
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /Si O <sub>2</sub>	3,2-3,9	300-414	1800-2000	0,3-0,8
organické:				
Kevlar 49	1,45	130	2900	2,5
Kevlar 29	1,45	60	2700	5,0
Kevlar 129	1,44	120	3000	3,0
Kevlar 149	1,45	190	2600	2,5
PE Spectra	0,97	172	3000	1,7
PBT	1,50	250	2400	1,5
Len	1,30	180	2600	3,1

#### 1.4.1 Skelná vlákna

Vzhledem k příznivé ceně a velmi dobrým mechanickým vlastnostem jsou dnes skelná vlákna nejpoužívanější výztuží. Jsou zcela nehořlavé. Skelné vlákno má pevnost v tahu 2200–3500 MPa. Oproti modernějším vláknům se však vyznačují nižším modulem

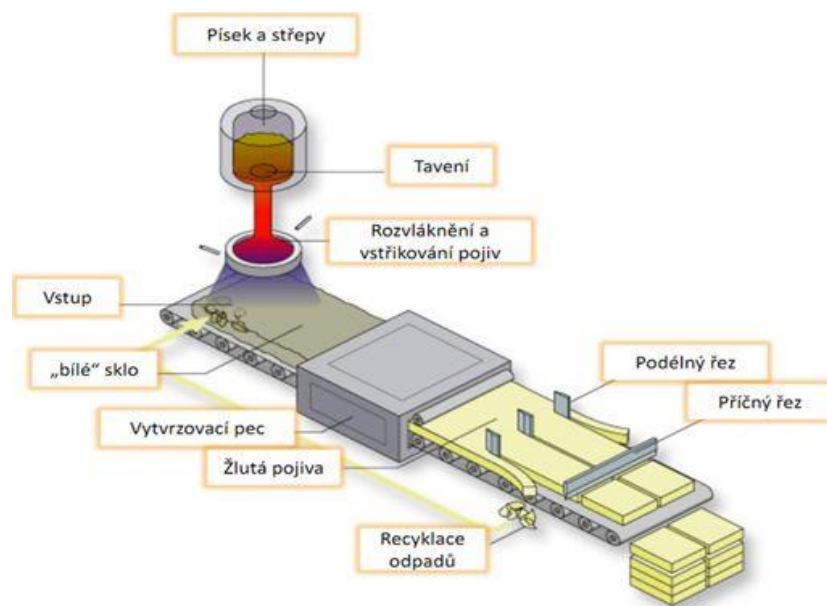
pružnosti, jen 70–85 GPa a sklonem k lámavosti, což je problém při manipulaci a nemožnost aplikace jako balistické ochrany [15].

Vylepšení v některých ohledech přinesly skelná vlákna se silikátovým základem, kdy se sice pevnost v tahu snížila na 1800–2000 MPa, ale modul pružnosti v tahu stoupl na 300 - 414 GPa. Z technologických důvodů se tloušťka vláken běžně pohybuje od 7 do 15  $\mu\text{m}$ . Tato vlákna se vyrábějí tažením taveniny a před samotným navinutím na cívku do rovin je aplikována povrchová úprava. Kontakt mezi neošetřenými vlákny by způsobil velkou abrazi, což by vedlo k poklesu pevnosti. Hned po vytvrzení vlákna je aplikována lubrikační látka, která dovoluje zpracovat vlákna jako do rovin, tak následně do tkaniny. Tuto vrstvu je pak nutné odstranit, aby bylo dosaženo co nejlepší adheze vlákna a matrice. Tkaniny se pak ještě ošetřují vazebnými prostředky, které mají dobrou afinitu ke skelným vláknům i k polymerní matici [9], [15].



*Obr. 8 Skelná vlákna [9]*



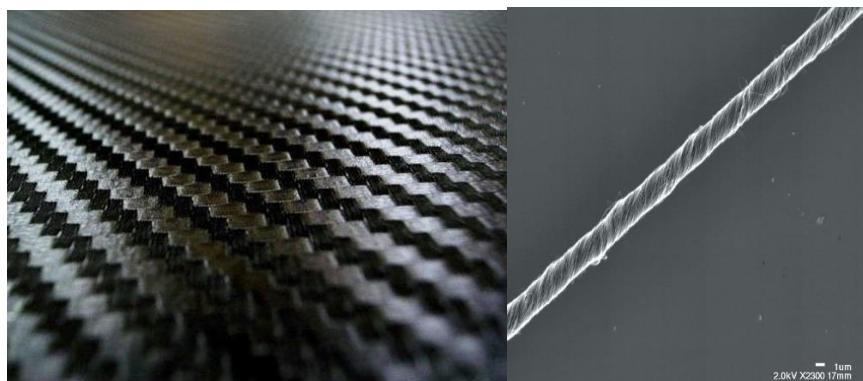


Obr. 9 Technologie výroby skelného vlákna [9]

#### 1.4.2 Uhlíková vlákna

Uhlíková vlákna se vyznačují nejširším spektrem mechanických vlastností při nízké hustotě, proto se hodí pro aplikace, kde je požadována vysoká pevnost a tuhost při nízké hmotnosti. Oproti skelným vláknům jsou však podstatně dražší, což jejich záběr využitelnosti trochu zužuje. Pevnost v tahu se pohybuje mezi 1500–3000 MPa a modul pružnosti v tahu je 150–300 GPa. Zvláštností uhlíkových vláken je záporný koeficient délkové teplotní roztažnosti, tedy při zahřátí se vlákno zkracuje. Další specifickou vlastností je vytváření galvanického článku při styku s méně ušlechtilými kovy a vznik koroze. Proto je při konstrukci nutné oddělit tyto dvě složky nevodivým materiálem nebo aplikováním povrchové úpravy.

Podobně jako na skelná vlákna, tak i na uhlíkové je nutné aplikovat povrchovou úpravu. Nejčastěji se povrch ošetřuje polymerními povlaky na bázi epoxidů nebo polyamidů. Účelem je ochrana vláken proti abrazi, zajištění lepší absorpci matrice do vlákna, případně odstranění látek, které zůstaly na povrchu od výroby. Navzdory vysoké ceně a zmíněným specifickým vlastnostem však postoupili z dopravních letadel na ultralehké, a kromě super sportovních aut nacházejí uplatnění i v pohonech běžných automobilů [9].



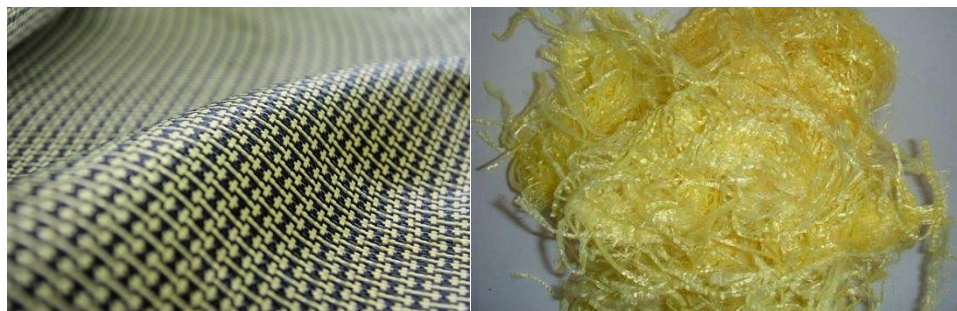
Obr. 10 Uhlíková vlákna [9]



Obr. 11 Pracovní linka pro výrobu vláken PAN [9]

### 1.4.3 Aramidová vlákna

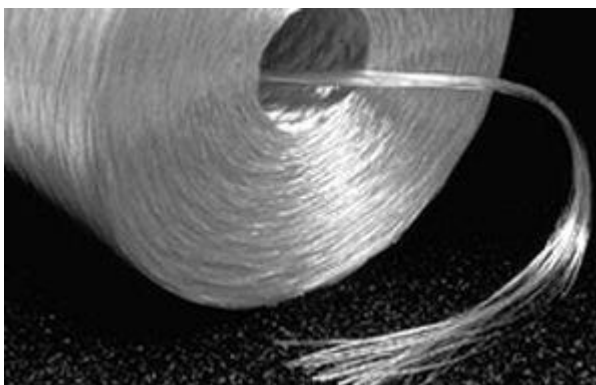
Také známé pod jedním z obchodních označení – Kevlar. Jsou nejsnáze vyztužující vlákna a jsou schopny plastické deformace kolmo na osu vlákna. Vyznačují se vysokou abrazivní odolností. Dosahují pevnost v tahu mezi 2500–3500 MPa a modul pružnosti 70–170 GPa. Hodnoty mechanických vlastností se liší v závislosti na výrobní technologii. Jsou vhodné pro výrobu prostředků balistické ochrany a výrobu ochranných oděvů. Častokrát se objevují například spolu s uhlíkovými vlákny v hybridních tkaninách a lze je zpracovávat se všemi běžnými reaktoplasty a termoplasty. Podobně jako uhlíková vlákna, mají i aramidová záporný součinitel teplotní roztažnosti ve směru osy vláken [9].



Obr. 12 Kevlarová vlákna [9]

#### 1.4.4 Bórová vlákna

Vyrábějí se technologií CVD. Na wolframovém vlákně se vytváří elementární bor ze směsi plynů vodíku a chloridu boritého. Tedy borové vlákno má wolframové jádro a na povrchu je bór. Jsou náchylné k oxidaci za zvýšených teplot a reakci s roztaveným hliníkem, proto se povlakuje SiC nebo B<sub>4</sub>C. Těmito povlaky se kromě ochrany docílí i vyšší smáčivost s matricí. Vyznačují se vysokou pevností – až 4000 MPa a malou tepelnou roztažností. Oproti skleněným či uhlíkovým vláknům dosahují větší tloušťku, 100  $\mu$ m. Nejčastěji jsou používány s hliníkovou matricí. Borové vlákno se nemůže ohýbat a nedá se tkát. Proto jsou používány na plošné díly, u nichž se vyžaduje vysoká tuhost. Poprvé byly použity na výrobu raketoplánů. Pro reakce s hliníkem se však nahrazují modernějšími vlákny [9], [16, 17, 18].



Obr. 13 Bórové vlákno [16]

#### 1.4.5 Ostatní

Méně významné jsou přírodní rostlinná vlákna například z konopí. Používají se na výztuž dílů automobilů, především v interiérech. Výhodou použití těchto vláken je jejich cena, nízká náročnost na opracování a v neposlední řadě jednodušší recyklovatelnost oproti ostatním kompozitům [9].

## 1.5 Mechanické vlastnosti kompozitů

### *Tuhost*

Tato veličina vyjadřuje sílu, kterou musíme vynaložit, abychom zjistili deformaci tělesa v pružné oblasti deformací, kde mírou této síly je modul pružnosti ve smyku a v tahu.

### *Pevnost*

U polymerů se tato veličina mění v návaznosti na jejich strukturu ať už molekulární, nebo nadmolekulární. U tvarů křivek z provedené zkoušky zjistíme, zda daný polymer leží v oblasti teplot pod nebo nad teplotou skelného přechodu  $T_g$ . Při překonání pružné deformace dojde k přetržení tělesa, a to u amorfních polymerů, které se nachází pod  $T_g$ . Například u některých semikrystalických polymerů dochází při překonání meze kluzu a napětí na mezi pevnosti ke zpevňování, a tak může být i několikrát větší než napětí na mezi kluzu.

### *Tvrдость*

Poměrně složitá veličina, kde souvisí jak vnitřní vlastnosti, tak i kvalita povrchu daného polymeru. U elastomerů existují určité empirické vztahy při přepočtu mezi tvrdostí a modulem pružnosti ve smyku. Podle literatury lze uvést tvrdost, která je v časté míře používána pro charakterizaci elastomerů, poté tvrdost HRC pro tvrdé polymerní materiály pod  $T_g$ , kde se jako nejčastěji zkouška vykonává vtiskem kuličky do zkušební vzorku.

### *Houževnatost*

Tato důležitá vlastnost materiálu poukazuje na množství práce, která je zapotřebí ke vzniku nového povrchu. U této vlastnosti materiálu ji nejlépe dokáže vystihnout hodnota lomové houževnatosti  $K_c$  a hnací síla trhliny  $G$ . Tyto veličiny se v literatuře nevyskytují, a tak jsou hlavním předmětem provedení zkoušek. Ve větší části je nutné se omezit na údaje, které jsou poskytnuty plastikářskými zkušebními metodami, tj. rázová houževnatost metodou Izod a Charpy s vrubem či bez vrubu. Pro vysoce houževnaté materiály je zapotřebí použít tělesa s jiným tvarem vrubu než u méně houževnatých materiálů, tím pádem je vzájemné srovnání těchto dvou materiálů na základě číselných údajů o vynaložených energiích dosti složité. [19]

### 1.5.1 Druhy zkoušek mechanických vlastností

Obvykle nás při technickém použití polymerů zajímá především jejich mechanická pevnosti působící proti různým silám. Tyto zkušební metody můžeme rozdělit do těchto tří skupin:

**Statické zkoušky** – materiál je u těchto zkoušek namáhán pomalu se měnícími silami. Působící síla se zvyšuje rovnoměrně pomalu, obvykle tak bývá až do okamžiku porušení zkušebního tělesa.

**Dynamické zkoušky** – u tohoto typu zkoušek se působení síly mění buď rázem, nebo se síla mění za velmi krátký časový úsek. V některých případech zkouška probíhá tak, že působení síly je dlouhodobé, ale její velikost se mění periodicky ve velmi krátké době

**Únavové zkoušky** – Mechanické vlastnosti se u této zkoušky zkoušejí dlouhodobě za předem předepsaných podmínek časově proměnného namáhání, často až do porušení materiálu, kde tyto zkoušky bývají odlišné pro každý jednotlivých druh polymeru.

Mechanické zkoušky často neprovádíme na samotné součásti, nýbrž na zkušebních tělesech předepsaného tvaru a rozměrů. [20]

## 2 ÚNAVA MATERIÁLU

Cílem únavových zkoušek je určení únavového života součásti, nebo místo vzniku porušení na zkušebním tělese podrobení předem určené posloupnosti amplitud napětí. V některých případech toto může být jediný důvod děláni zkoušky, například složitější sestavy se podrobí takovým zkouškám za účelem simulace zátěžové historie probíhající v průmyslu. Ve většině případů je ale třeba, aby zkoušky byly navrhované za účelem nejen zodpovězení námi hledaných otázek, ale aby nám výsledky napomohly k zobecnění a vzniku nových pravidel týkajících se mezi únavy s rozličnými ovlivňujícími faktory. Je proto nezbytné, aby se zkoušky prováděly za podmínek buď to s ohledem na posloupnost zátěžových amplitud nebo na testovaný vzorek nebo na obojí. Zjednodušením zkušebních podmínek by mělo být možné změnit jeden nebo více faktorů, které zkoušku ovlivňují a zjistit jejich účinek. I když se nám podaří tyto podmínky splnit, stále zůstává několik neznámých a nekontrolovaných prvků, které vytvářejí rozptyl v únavových životech těles, které se dají považovat za identické. V minulosti se tento rozptyl nepovažoval za důležitý a pro určení únavového života se používalo jen pár vzorků. V dnešní době se tento rozptyl považuje za přirozenou součást únavových vlastností a pro určení únavového života je třeba větší množství vzorků. [4]

Nejjednodušším příkladem testů s ohledem na amplitudy zatížení je aplikování napětí konstantní amplitudy na zkušební těleso, dokud nenastane lom. Pro nové těleso může být použito jiné napětí, ale pro každé jednotlivé těleso se amplituda během celé zkoušky nemůže měnit. Tento typ únavové zkoušky se nazývá zkouška při konstantní amplitudě.

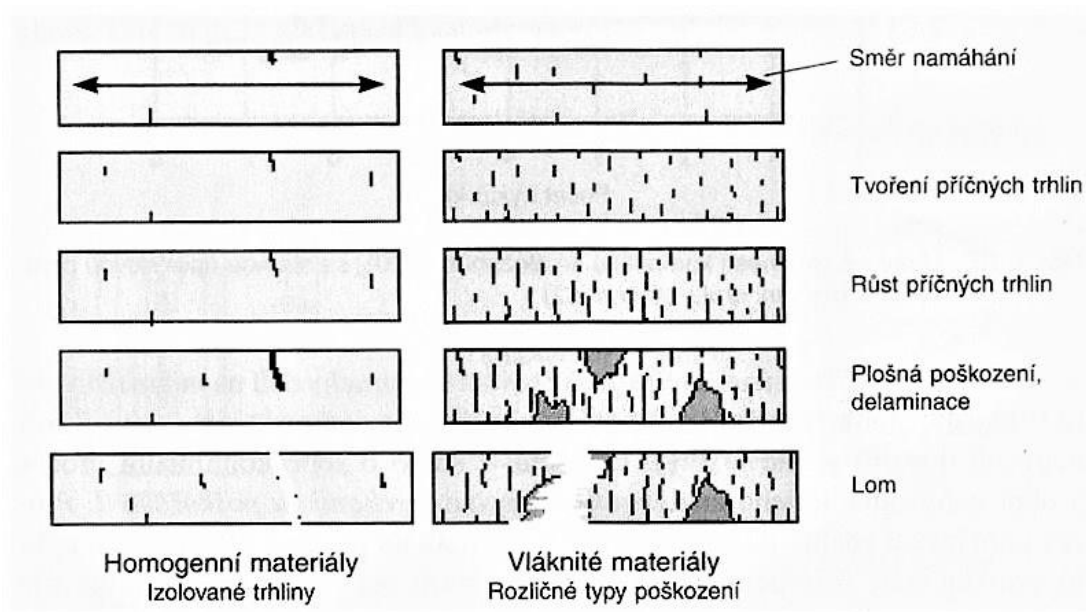
V závislosti na velikosti amplitudy napětí můžeme zkoušky za konstantní amplitudy rozdělit do tří kategorií:

1. Rutinní zkoušky, kde je použité napětí je vybíráno tak, že při všech zkouškách nastává lom po přiměřeném počtu cyklů, řekněme od 104 do 107.
2. Nízkocyklové zkoušky, kde amplituda napětí je volena z oblasti nad mezí kluzu a v některých situacích může nastat lom okamžitě po použití zatížení.
3. Vysokocyklové zkoušky, při kterých je amplituda napětí volena pod nebo mírně nad mez únavy a porušení vzorku nastává při 106 až 107 cyklů.

Samozřejmě, neexistuje přesná hranice, která by oddělovala jeden typ od druhého. [4]

## 2.1 Únavové poškození kompozitních materiálů

U kovových materiálů můžeme počítat se vznikem lokálně působící trhliny, kdežto u vláknových kompozitních materiálů se vytváří při dynamickém namáhání různé typy trhlín ve velkém objemu materiálu. Tyto trhliny pak nemají tak velký vliv jako u kovových materiálů (Obr.14). Tento růst trhlín pak zpravidla může být zastaven vedlejší houževnatější složkou materiálu. [1]



Obr. 14 Rozdíl u poškození homogenních a kompozitních materiálů [1]

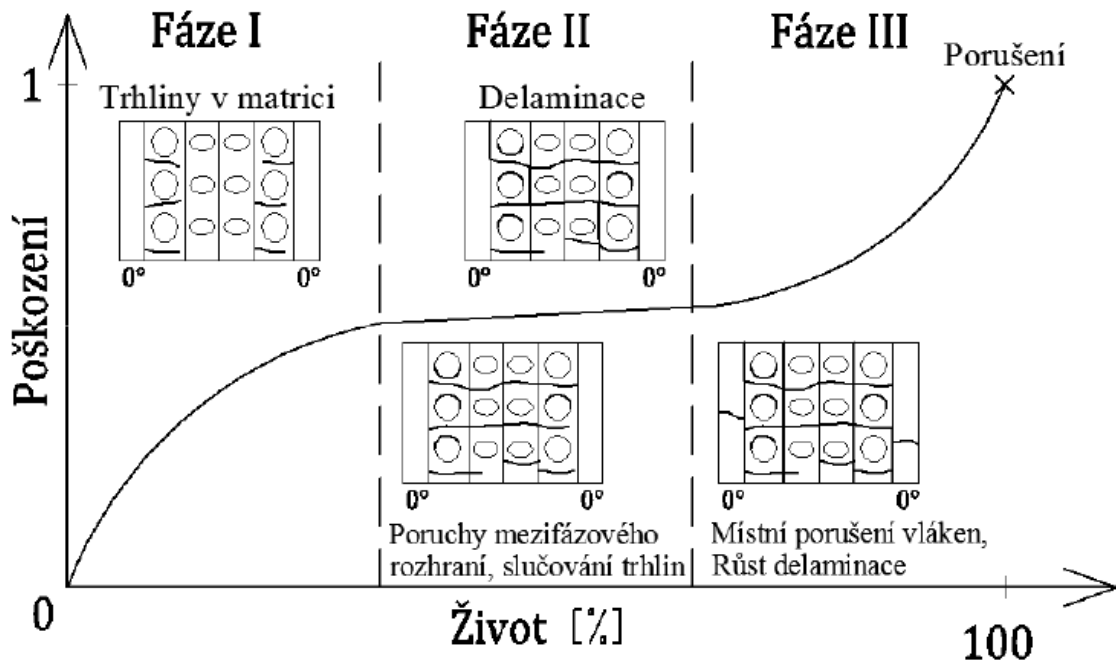
Typy, které se vyskytují u poškození a vzniku trhlín u vyztužených kompozitů lze dělit do těchto skupin:

- Trhliny v matrici
- Porušení vláken
- Porušení vláken s matricí
- Porušení soudržnosti jednotlivých vrstev (delaminace)

### 2.1.1 Fáze poškození

Při únavovém poškození kompozitního materiálu lze tento typický proces rozdělit do tří fází. V první fázi nastává poškození už při několika desítkách cyklů a je často doprovázeno strmým nárůstem tohoto poškození, kde se hlavním mechanismem se stává iniciace trhlinek přímo v matrici. Ve druhé fázi nastává postupným nárůstem poškození, kdy je rostoucí hustota trhlinek hlavním mechanismem této změny v poškození. Při této změně se vyskytuje

vláknové přemostění, oddělování matrice od vlákna, rozptýlené porušení vláken a může zde být iniciována i delaminace. V poslední třetí fázi dochází k růstu delaminace, globálnímu porušení a taktéž k masivnímu porušení vláken. [21]



Obr. 15 Rozvoj typů poškození během zkoušky u kompozitních těles

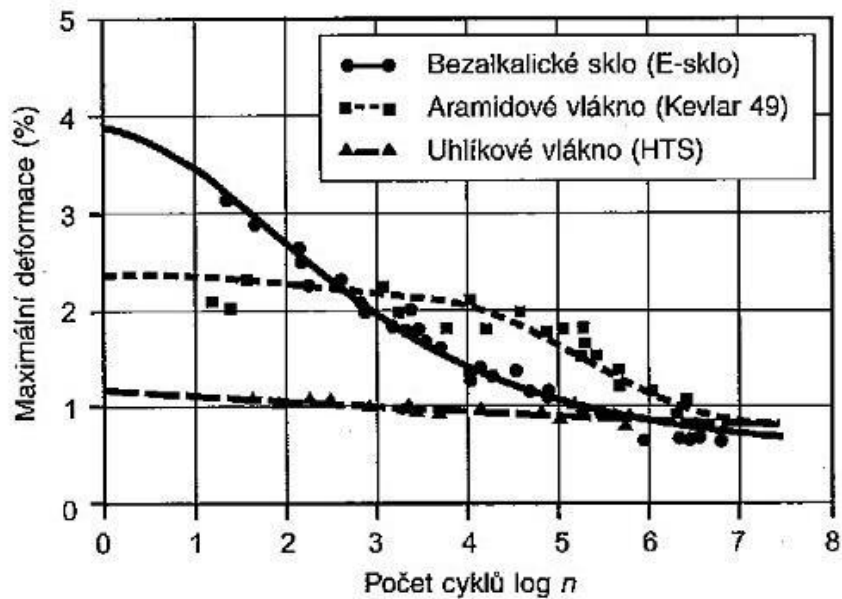
Celkový rozsah a časový úsek u jednotlivých typů poškození je závislý na jednotlivých vlastnostech daného kompozitu (např. obsahu a typu vlákna, orientace vrstev) a také na působícím napětí. U těchto poškozování se za vznik a rozvoj považuje i spolupůsobení ostatních typů poruch, tudíž je často kvalitativně obtížné ocenit vliv jednotlivých poruch a poté vyvodit výsledky a obecné zákonitosti procesu porušování.

Při procesu únavového poškozování lze dělit poruchy na

- **Mikroskopické** – velikost jednoho nebo více průměrů vlákna
- **Makroskopické** – velikost minimální tloušťky jedné vrstvy

Při procesu porušování se začíná na mikroskopické úrovni, kde vznikají třídímní oblasti poškození. Tento jev se projevuje snížením tuhosti materiálu a když se dosáhne kritická hodnota, zbytková pevnost či tuhost klesne pod úroveň působícího namáhání a dojde tak k lomu. Samozřejmě závisí i na vlastnostech daného materiálu a použitém typu pryskyřice či volbě materiálu u vláken. [21]





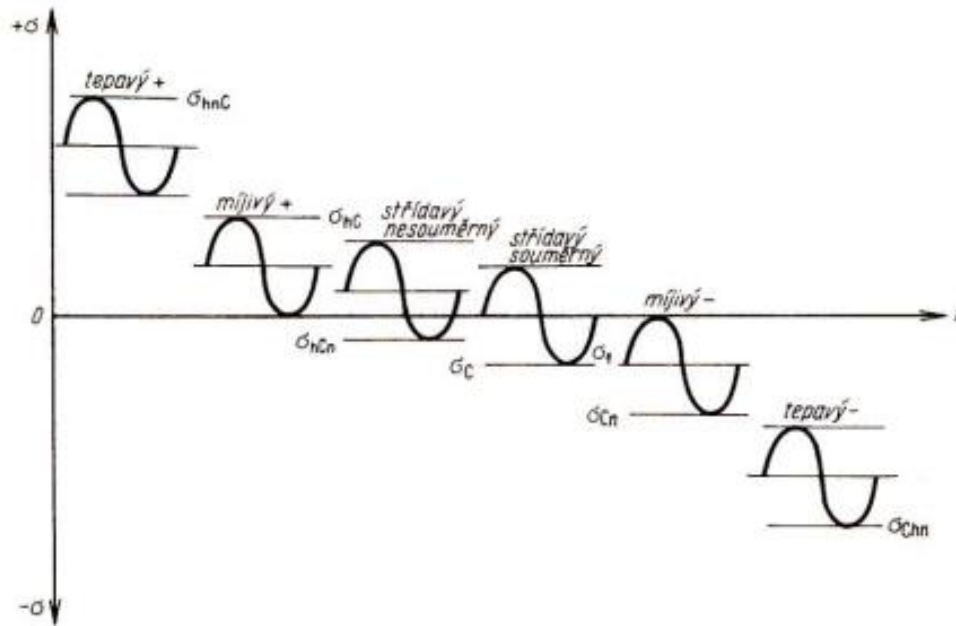
Obr. 16 Srovnání únavových vlastností u kompozitů [1]

## 2.2 Únavová zkouška

Při dynamickém zatížení se pro zjištění namáhání vyskytují dvě metody, jednostupňová a víceúrovňová zkouška. Jednostupňová zkouška probíhá tak, že je vyšetřovaná úroveň zatížení, při které se projevují změny vyvolané únavovým zatížením. Kdežto víceúrovňová je protikladem, kdy samotná zkouška probíhá tak, že se zkušební těleso zatíží na danou úroveň napětí či deformace, kde u materiálu neprobíhají žádné změny ani tvorba trhlin. Poté následuje stupňovité zvyšování zatížení až do doby, kdy můžeme míru poškození zjistit. [1]

### 2.2.1 Typy zatížení

U kompozitních materiálů vznikají odlišné mechanismy porušování, proto se chovají jinak ať jsou zatěžovány tlakem či tahem. Při zatížení tahovým namáháním má na únavové chování vliv hlavně vyztužující vlákno, při zatížení tlakem má větší význam typ použité matrice a vady materiálu. U cyklického zatížení se můžeme především setkat se sinusovým průběhem, kdy se jeho hodnoty mění od minima do maxima. U dynamických zkoušek pak mohou být zkoušky provedeny ve třech rozsazích, kde se můžeme setkat až se sedmi typy zatížení. U této úrovně cyklického namáhání je charakteristickým rozměrem poměr dolního a horního napětí. Největší amplitudou napětí  $\sigma_D$  je pak dána únavová pevnost, kde zjistíme, jaký počet je zkušební těleso schopno absorbovat cyklů. Při překročení této únavové pevnosti nastává přelomení vzorku. [1], [22]



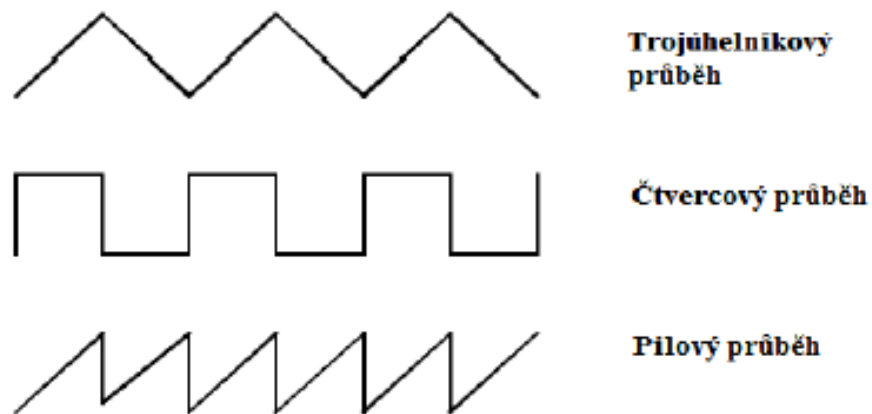
Obr. 17 Typy a úrovně cyklického zatěžování [1]

### 2.2.2 Frekvence při zkoušce

Nejdůležitějším faktorem u testování materiálů z kompozitů je frekvence zatěžování. Tato frekvence má hlavní vliv na únavovou životnost materiálu. Hlavní veličina je zde frekvence, která se značí písmenem  $f$  a jednotky k této veličině jsou Hertze (Hz), tuto veličinu uvést i v počtech cyklů za sekundu. Když použijeme vysoké frekvence může dojít k ohřevu materiálu což je nežádoucí jev při testování. Pro vyloučení tohoto jevu volíme u nevyztužených termoplastů frekvenci 1-5 Hz a u vyztužených se volí 5-10 Hz. Samozřejmě zkoušky únavy probíhají pro různé deformační rychlosti a pro různé typy zatížení vždy při konstantní frekvenci. [1], [22]

### 2.2.3 Průběh zatěžování

Důležitým elementem pro únavovou životnost materiálu je taktéž tvar průběhu zatěžovací křivky. Mezi nejpoužívanější průběh zatížení je brán sinusový, je jednoduše definovatelný na stroji a taktéž odpovídá reálnému zatěžování. Mezi další průběhy zatěžování mohou být brány tvary jako čtvercový, trojúhelníkový či pilový. [22]



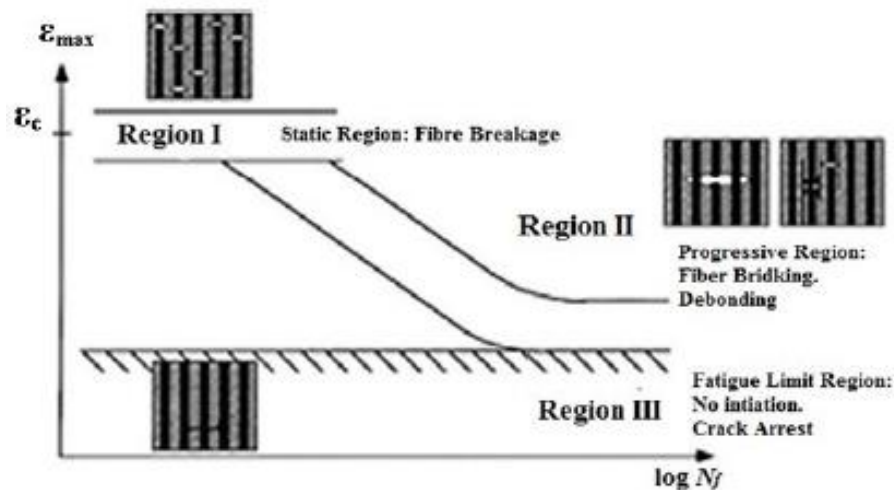
Obr. 18 Možné modifikace u zatěžovací křivky [1]

## 2.3 Křivky únavového zatěžování

### 2.3.1 Křivka životnosti $\epsilon_A - N_f$

Už v počátcích zkoumání poškozování kompozitů existoval zkreslený předpoklad, kdy proces únavového poškození měl stejně jako u kovů skládat z fáze inicializace a šíření defektu. Při zkoumání nebyl vůbec zohledněn rozdíl mezi polymerní strukturou matrice kompozitního materiálu a krystalickou strukturou materiálů kovových. V tomto případě se jedná o závislosti počtu cyklů do úplného porušení na maximální možné deformaci při prvním cyklu při měkkém zatěžování. Následný diagram je pak rozdělen do tří oblastí.

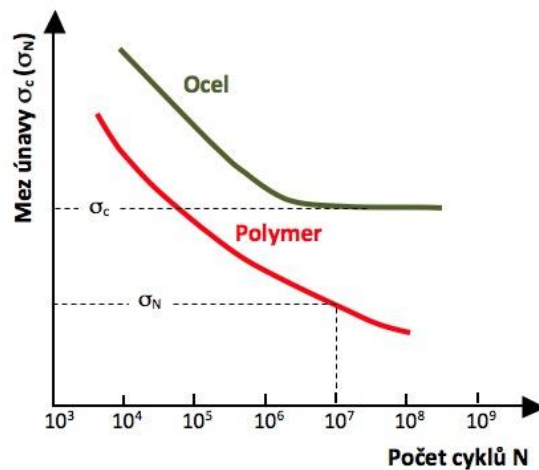
- Oblast 1 – pásmo rozptylu statické pevnosti v tahu. Porušení je náhodné a náhlé porušení vláken.
- Oblast 2 – zde dochází k postupnému poškozování. Vznikají trhliny v matrici, praskání matrice a přes rozhraní vlákno-matrice vzniká "vláknové přemostění"
- Oblast 3 – zastavení šíření mikrotrhlin v matrici na rozhraní vlákno-matrice. U vysokotuhostních kompozitů však může dojít k dezinterpretaci, kde pás rozptylu leží celý v oblasti 3 a tak může dojít ke špatné informaci, že u vysokotuhostních kompozitů nedochází k únavovému poškozování.



Obr. 19 Diagram únavové životnosti zatěžovaný ve směru vláken [22]

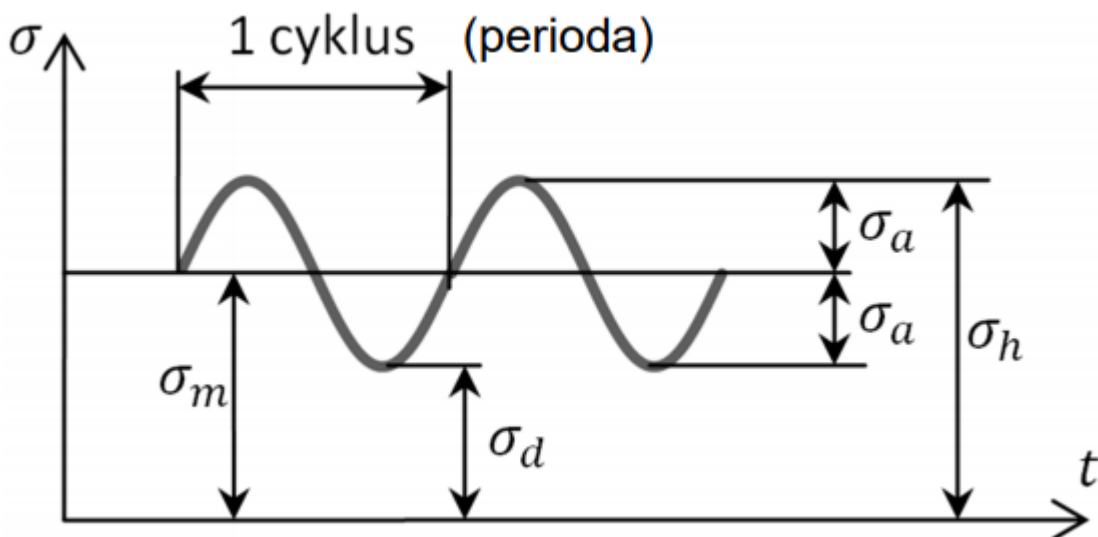
### 2.3.2 Wöhlerova křivka

Tato křivka bývá taktéž označována jako S-N diagram, která je nejrozšířenější k popisu únavového chování u vláken vyztuženými kompozitními materiály. Hlavním kritériem únavy je lom, kde se uskuteční porušení zkušební vzorku. U součástí, které zatěžujeme dynamicky, je lom často nedostatečným kritériem, nýbrž u kompozitních materiálů se s rostoucím zatížením a následnou únavou více či méně dostavuje pokles tuhosti. Tento pokles je pak možný pro použití materiálů pro konstrukční prvky, kdy se s počtem cyklů můžou měnit vlastnosti v určitých mezích. Když budeme brát jako kritérium únavy pokles tuhosti například o 10 až 20 % a následně ho vyneseme do Wöhlerova diagramu, zjistíme další informace o časovém průběhu únavového chování. Abychom poté zjistili a stanovili zbytkovou pevnost, musíme po určitém počtu cyklů podrobit zkušební těleso statické zkoušce. [1]



Obr. 20 Wöhlerova křivka pro srovnání polymer a ocel

### 2.3.2.1 Zatěžovací cyklus



Obr. 21 Charakteristika cyklického zatěžování [1]

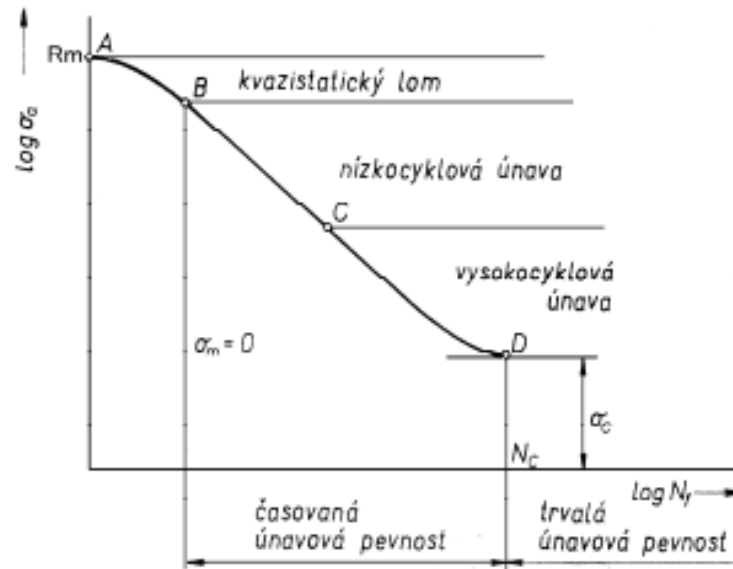
- $\sigma_a$ ... amplituda napětí
- $\sigma_h$ ... horní napětí
- $\sigma_d$ ... dolní napětí
- $\sigma_m$ ... střední napětí =  $\frac{\sigma_h + \sigma_d}{2}$

### 2.3.2.2 Oblasti Wöhlerovy křivky

Mezi oblasti Wöhlerovy křivky patří tyto:

- Oblast kvazistického lomu: Lom nastává po několika desítkách cyklů

- Oblast nízkocyklické únavy: Nastává zde vyšší napětí jako je mez kluzu  $R_e$
- Oblast vysokocyklické únavy: Nastává zde nižší napětí jako je mez kluzu  $R_e$



Obr. 22 Charakteristické oblasti na Wöhlerově křivce [1]

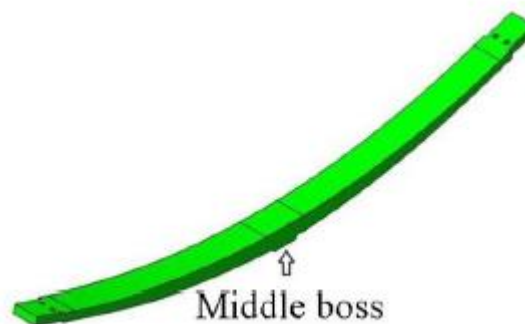
### 3 FAKTORY OVLIVŇUJÍCÍ ÚNAVOVÉ CHOVÁNÍ A ŽIVOTNOST

Polymerní materiály nacházejí velké uplatnění v technickém průmyslu hlavně pro jejich velkou odolnost vůči korozi. Proto se používají ve velké míře jako ochranné prostředky kovů, stavebních hmot, dřeva a někdy je i dokonce nahrazují. Avšak nejsou odolné v plné míře. U polymerních materiálů vystavených fyzikálním, chemickým, případně biologickým procesům v delších časových intervalech dochází k nevratným změnám a také stárnutím. Souhrn rozkladových reakcí polymerů označujeme pojmem degradace. Depolymerizace je proces, během kterého degradují makromolekuly na nižší strukturální jednotky případně až na samotné monomery. V případě, že dochází k hloubkovým procesům dá se tento děj označit i jako rozklad. Během tohoto procesu dochází k odbourávání spojenému se změnou chemické struktury daného materiálu. Pojmem koroze označujeme znehodnocení materiálu vzájemným chemickým nebo fyzikálněchemickým působením okolního prostředí. Tento proces nevyžaduje světelnou ani tepelnou iniciaci, avšak tepelná energie ho urychluje. Proces probíhající v materiálu v důsledku dlouhodobého statického nebo cyklického namáhání lze označit jako únavu materiálu. Tento děj způsobuje pokles mechanických vlastností materiálu, což v konečném důsledku znamená, že dochází k jeho porušení při nižších napětích. Negativní změny materiálu neprobíhají pouze při jeho používání, ale často k nim dochází již při samotném zpracování nejčastěji vlivem mechanického a tepelného namáhání. Studium těchto dějů vede k novým poznatkům, umožňujících omezení, případně předcházení negativních dopadů na polymer. [23]

#### 3.1 Vliv skládání vrstev

Na míru únavových vlastností z kompozitů a výrobků z něj má velký vliv vrstvení jednotlivých vrstev, a to zejména u kompozitních pružin. Mezi jeden z příkladů lze uvést listovou kompozitní pružinu, ve které je tloušťka jednotlivých složek měněna přesahující délkou ukončených vrstev a vytvářením mezer v bodech podél ní. U symetrického, spojitého kompozitu s konstantním průřezem pod jednosměrným napětím ve směru vláken je namáhání jednoosé a rovnoměrné v rámci vrstev rovnoběžně s působícím zatížením. U listové kompozitní pružiny je namáhání stále rovnoměrné v dostatečné vzdálenosti od mezer vrstvy a oblasti pro aplikaci zatížení, avšak při každém poklesu mezery musí být napětí v rozevřené vrstvě přerozděleno do sousedních vrstev. Tento přenos napětí se projevuje na krátké vzdálenosti, čímž se vytváří lokální oblast s vysokým smykovým napětím, což znamená, že interlaminární pevnost materiálu je důležitá pro kuželové kompozity. Na obr. 1

je znázorněno rozložení vnitřního napětí na pokles kapky; zvýšení přímého namáhání z tlustší oblasti na tenčí oblast, spolu se znázorněním vysokého smykového napětí mezi vrstvami. Mezilaminární smyková pevnost kompozitu závisí na jeho vlastnostech pryskyřice. První generace kompozitní pryskyřice byla vyrobena z čistého epoxidu, což je termosetový polymer. Vzhledem k tomu, že termosetové polymery jsou křehčí než termoplasty, nejsou interlaminární povrchy pryskyřičných kompozitů první generace schopny absorbovat větší množství lomové energie, což jim dává nízkou interlaminární pevnost. Druhé generace, například 8552, jsou vytvrzeny rozpuštěním termoplastu uvnitř epoxidu, čímž se zvyšuje lomová houževnatost materiálu a tím i jeho interlaminární pevnost. Pryskyřice třetí generace, jako je M21, si tento krok dále zachovávají zachováním další vrstvy nerozpuštěných termoplastických částic mezi vrstvami, se specifickým záměrem zlepšit interlaminární sílu [34]



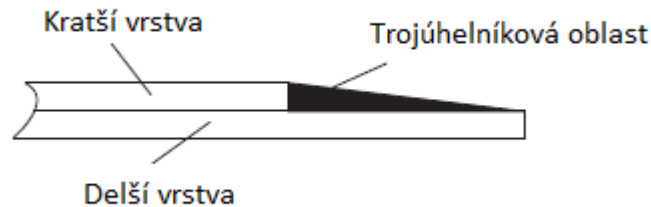
Obr. 23 Struktura kompozitní listové pružiny [34]

Nejprve se ve vnitřní matici objeví únavové trhliny k únavovému závěru složené listové pružiny. Únava trhliny se pravděpodobně objeví v oblastech trojúhelníku vyplněných maticovým materiálem. Oblasti trojúhelníku jsou pojmenovány společně jako únavově slabá oblast. Mezitím existuje několik oblastí, kde je slabá únava na průřezu každé kratší a delší vrstvy z důvodu přítomnosti gradientových vrstev v těle kompozitní listové pružiny. Proces únavy nastává v předběžné fázi, trhliny se vyskytují v každé oblasti slabosti únavy a pak se navzájem spojují, jak se zvyšují únavové cykly, což vede k selhání delaminace. Vzhledem k tomu, že kompozitní listové pružiny jsou kritické pro bezpečnost, mělo by být považováno za únavové selhání při delaminaci selhání kompozitních listových pružin. Navrhovaná únavová závada parabolického kompozitu listové pružiny je popsána takto:

(1) Úzká slabá oblast je na křižovatce delší a kratší vrstvy, a počáteční únavová trhlina nastane v slabém místě.



(2) Trhlina z oblasti slabosti únavy se šíří se zvýšením únavového cyklu, což nakonec vede k delaminaci selhání kompozitní listové pružiny. [32,33]



Obr. 24 Oblast trojúhelníku mezi kratší a delší vrstvou [33]

## 3.2 Degradční procesy

Změny v polymerech rozdělujeme do několika základních skupin jako termodegradace, fotodegradace, mechanická degradace a biodegradace. Pokud je během procesu tepelné nebo světelné iniciace přítomen kyslík, lze hovořit o termooxidaci a fotooxidaci. V neposlední řadě může dojít ke změně nadmolekulární struktury, která také ovlivňuje životnost materiálu. [24]

### 3.2.1 Termodegradace

Jeden z hlavních zdrojů problémů, při zpracování polymerů, pochází z vysoké viskozity taveniny polymerů. Většina průmyslových termoplastických polymerů, jsou zpracovávány v teplotním intervalu 400–650 K. Je zřejmé, že zpracování v intervalu 800-1000 K, kde se očekává, že viskozita je obvykle 10 až 1000krát nižší, by minimalizovala mnoho důležitých technologických a ekonomických omezení. Bohužel, to není možné, protože polymery jsou při těchto teplotách tepelně nestabilní. Zpracovatelské činnosti jsou vždy prováděny v teplotních oblastech, kde viskozita taveniny je poměrně vysoká, těsně pod  $t_0$ , což lze také nazývat maximální teplotou, při které je materiál ještě stabilní. Podstatným kritériem je však difúzní hranice: není přesně stanoven diskrétní práh degradačních procesů. To znamená, že optimální podmínky zpracování se obecně týkají malé části strukturální integrity makromolekul. Tepelným účinkem vyvolaný rozpad polymeru v inertní atmosféře nebo vakuu. Během tohoto procesu dochází ke vzniku těkavých produktů a nedefinovatelného uhlíkového zbytku. Důvodem zkoumání termodegradace je samotné zpracování materiálů, kdy se často dosahují teploty v rozmezí od 200 ° C do 300 ° C. Samotný rozklad se během tohoto procesu nemusí nějak výrazně projevit, ale vznikají poruchová centra, které jsou

příčinou následných reakcí. Pod pojmem tepelné stárnutí lze vnímat proces probíhající během výrazně nižších teplot než při tepelném rozkladu. Jde o dlouhodobý proces, během kterého nastávají změny jako na molekulární úrovni, tak na nadmolekulární struktuře. Tepelná odolnost polymerů je z velké části úzce spjata s pevností vazeb nacházejících se v polymerech. Odbourávání může probíhat dvěma způsoby. [24,25]

- **Statistické štěpení** – Sled jednotlivých štěpných reakcí na různých místech řetězce
- **Depolymerace** – Rozklad makromolekul, při kterém dochází ve velké míře ke vzniku monomerů. Tento typ rozpadu probíhá jen u malé skupiny materiálů.

### 3.2.2 Fotodegradace

Polymerní materiály jsou citlivé na ultrafialový podíl slunečního záření vyvolávajícího obdobné reakce jako tepelná energie. Dochází ke trhání řetězců, zesíťování a aktivaci oxidačních reakcí. Podmínkou fotodegradačních procesů je pohlcování záření. Polymery jsou citlivé i na jiné druhy záření než rentgenové, gama a kosmické, při čemž se na degradaci z největší míry podíly UV, vlivem kterého dochází k trhání makromolekul, tvorbě radikálů, případně zesíťování. Celý proces probíhá z větší míry statistickým štěpením. [24]

### 3.2.3 Mechanická degradace

Způsobuje změnu molekulární a nadmolekulární struktury, čímž ovlivňuje vlastnosti polymeru. Ke štěpení dochází v momentě, kdy se ve hmotě nahromadí vyšší napětí než pevnost kovalentní vazby. Degradacnímu mechanismu podléhají pevné materiály například během mletí, také však nastává u tavenin během běžného zpracování polymerů a v roztocích během míchání nebo průtokem roztoku kapilárami. V momentě, kdy se poruší vazba vzniká volný radikál. Nejvíce štěpných reakcí nastává za snížených teplot, se stoupající teplotou jejich množství klesá z důvodu vyšší ohebnosti řetězců a poklesu smykových sil. Jako první degradují delší řetězce a trhání probíhá, dokud není jejich délka kritická. U semikrystalických polymerů se trhají před-přednostně řetězce v amorfní fázi. V první fázi vznikají radikály v místě přerušení makromolekuly. Vzhledem ke své reaktivitě reagují se sousedním řetězcem za vzniku nového radikálu, který se nyní již nachází na řetězci. [24,26]

### 3.2.4 Změny nadmolekulární struktury

Během degradačních procesů dochází ke změně mechanických vlastností, rozpustnosti, teploty tání, k tvarovým a rozměrovým změnám, a v některých případech ke změně

zpracovatelnosti. Pod teplotou tání krystalického podílu jsou polymery s pravidelným uspořádáním řetězců schopné krystalizace. Její rychlost přímo závisí na teplotě a množství nepravidelností řetězců, případně nečistot nacházejících se u polymerů. Tyto závady způsobují snížení  $T_m$  a také způsobují snížení podílu krystalické fáze. Vznik krystalizačních zárodků je přímo spjat s mechanismem, kinetikou krystalizace a ve značné míře z průběhu chlazení. Z reálné praxe je zřejmé, že úplné krystalizace se u žádného polymeru nedá dosáhnout. Samotný krystalizační proces lze rozdělit na dvě fáze

- **Primární** – je definována rovnovážným stavem hustoty.
- **Sekundární** – projevuje se v případech, kdy se během primární fáze nedosáhne konečné hranice a krystalizace probíhá dále, což je charakterizováno zvýšením hustoty. Stárnutí materiálu, u kterého probíhá tento proces je závislé na jeho rychlosti, která je asi o dva řády nižší než rychlost primární krystalizace. Zapříčiňuje fyzikální, tvarové změny a vznik trhlin. [24, 26]

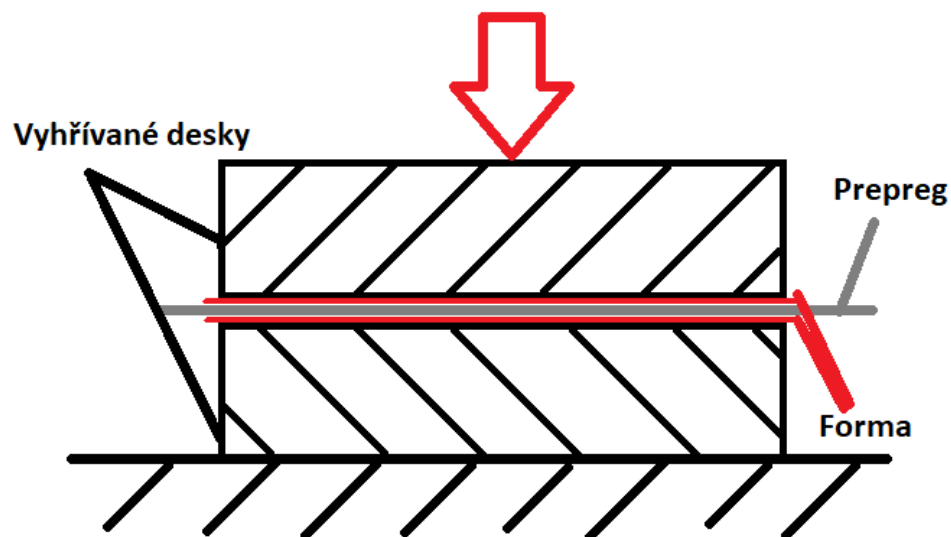
## **II. PRAKTICKÁ ČÁST**

## 4 VÝROBA ZKUŠEBNÍCH TĚLES

Zkušební tělesa byla vyráběna technologií lisování mezi vyhřívanými deskami. Tato technologie se využívá pouze pro malé zakázky, nebo přímo na zkušební tělesa. Výrobky dosahují dobré kvality povrchu i velmi dobrých mechanických vlastností.

### 4.1 Postup výroby

Jako technologie výroby zkušebních těles byla využita technologie lisování mezi vyhřívanými deskami, kde se musí desky nechat předem nahřát na předem určenou teplotu, při které bude lisování prováděno. Před samotným lisováním je zapotřebí si předpřipravit prepreg, který spočíval v ručním skládání vrstev na sebe po směru vlákna. Tyto prepregy byly vyrobeny celkově v šesti modifikacích.



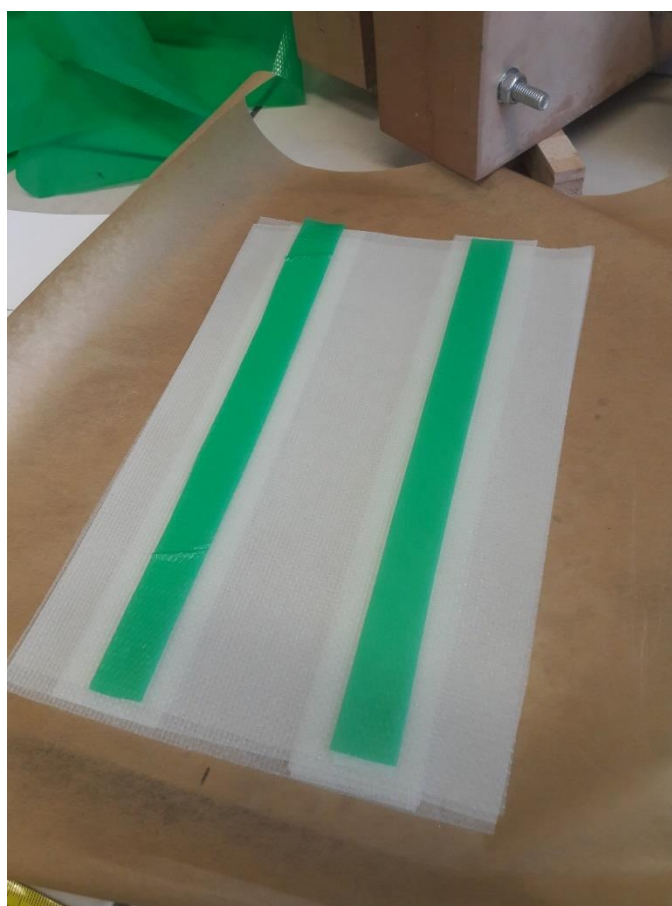
Obr. 25 Schéma lisování mezi vyhřívanými deskami

#### 4.1.1 Příprava před lisováním

Před lisováním je nutno si připravit předem určené množství materiálu, aby se dal vrstvit budoucí prepreg. Tyto odstřížky se stříhají z velké role materiálu, který je před použitím zmrazen na  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ , aby nedošlo k degradaci tohoto materiálu. Rozmrazený materiál jsem stříhal ve výšce 26 mm po pásech, které jsem pak stříhal na předem určenou modifikaci skládání vrstev.



*Obr. 26 Ukázka nastříhaných pásů a jednotlivých odstřížků před lisováním*



*Obr. 27 Ukázka jedné z modifikací kladení vrstev na sebe*

#### 4.1.2 Podmínky při lisování

Teplota vrchní desky	150°C
Teplota spodní desky	150°C
Čas lisování	15 min



Obr. 28 Příklad lisování mezi vyhřívanými deskami

#### 4.2 Příprava zkušebních těles k měření

Pro zjištění mechanických vlastností a rozlišností při kladení vrstev bylo zhotoveno 6 typů zkušebních těles z jednoho typu materiálu metodou lisování mezi vyhřívanými deskami, kde 4 typy budou namáhány na tříbodový ohyb a všech šest na tah. Pro únavové chování pak byly zhotoveny 2 sady zkušebních těles, které budou namáhány dynamicky v tahu.

#### 4.2.1 Použitý materiál

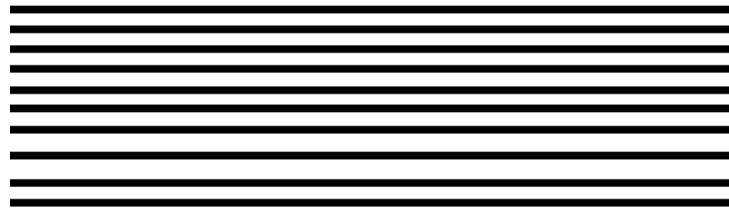
Mezi dostupnými materiály byl zvolen skelný prepreg s označením **Deltapreg VV430U-DT806R 34 % (H 124 cm)**, který je dodáván italskou firmou Delta. Tento materiál má jednosměrnou kontinuální výztuž ze skelných vláken, kde je hmotnostní obsah epoxidové pryskyřice 34 %. Tento materiál má pevnosti v ohybu  $\sigma_o=818$  MPa a modul pružnosti je  $E = 37\,400$  MPa.

#### 4.2.2 Modifikace vrstvení prepregů

Jako první byly zhotoveny zkušební vzorky z 10 vrstev odstřížků bez jakýchkoliv překladů v kontinuální vrstvách po směru vlákna pro třibodový ohyb.

Tab. 4 Rozměry vzorku 1.modifikace

Délka-L[mm]	Šířka-b[mm]	Tloušťka – a[mm]
80	20	3,2



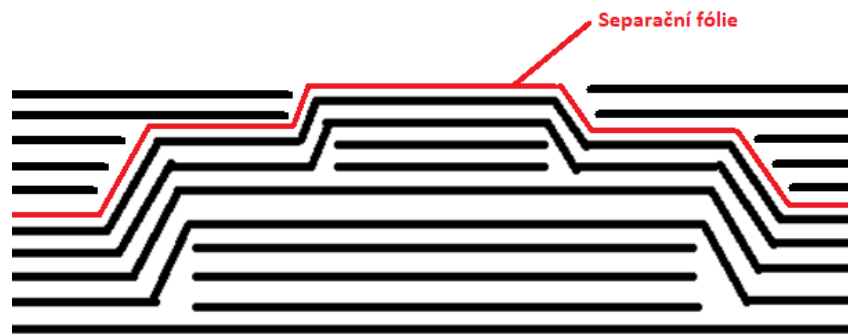
Obr. 29 Schéma vrstvení u vzorku č.1

U druhé modifikace byly vrstvy kladeny parabolicky, aby nejlépe simulovala překládání vrstev u kompozitních listových pružin. Tato deska musí být lisována včetně separační folie, aby nedošlo k poškození parabolického tvaru. Taktéž je deska vrstvena, aby se nacházelo ve středu přesně 10 vrstev prepregu.

Tab. 5 Rozměry vzorku 2.modifikace

Délka-L[mm]	Šířka-b[mm]	Tloušťka- a[mm]
80	20	3,1



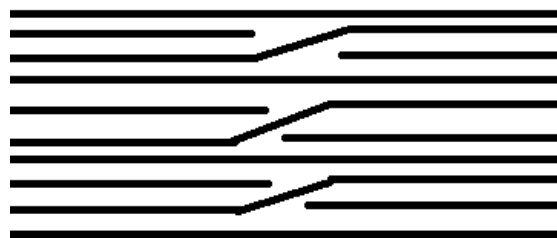


Obr. 30 Schéma vrstvení u vzorku č.2

Při třetí modifikaci byly jednotlivé odstřížky překládány podle schématu (obr. 31), kde 4 vrstvy byly podélně stejné vždy přes 2 vrstvy, které byly kladeny přes sebe.

Tab. 6 Rozměry vzorku 3.modifikace

Délka-L[mm]	Šířka-b[mm]	Tloušťka- a[mm]
80	20	3,1



Obr. 31 Schéma vrstvení u vzorku č.3

U čtvrté modifikace se nacházejí překlady přesně ve středu vrstev, kde se přes sebe překládají hned 3 vrstvy odstřížků. Nahoře i dole se nacházejí 2 souměrné vrstvy a dohromady je zde 10 vrstev.

Tab. 7 Rozměry vzorku 4.modifikace

Délka-L[mm]	Šířka-b[mm]	Tloušťka- a[mm]
80	20	3,2

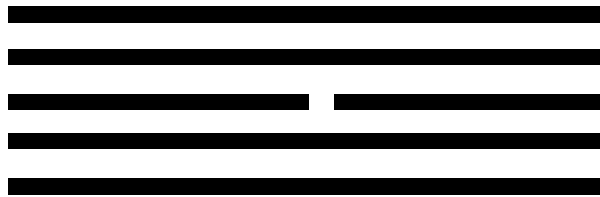


Obr. 32 Schéma vrstvení u vzorku č.4

Pátý vzorek je modifikován překladem, kdy přesně uprostřed je ve vrstvě mezera, a tak je tato vrstva narušena. Tento vzorek je sestaven s 5 vrstev s tím, že je zhotoven i na dynamické namáhání v tahu.

Tab. 8 Rozměry vzorku 5.modifikace

Délka-L[mm]	Šířka-b[mm]	Tloušťka- a[mm]
160	20	1,6



Obr. 33 Schéma vrstvení u vzorku č.5

U poslední modifikace je vrstvení odštívků z pěti vrstev, kde vnější vrstvy jsou souměrné a uprostřed prepregu jsou dvě vrstvy přeloženy vrstvou třetí, taktéž tyto zkušební tělesa budou dynamicky namáhány na tah.

Tab. 9 Rozměry vzorku 6.modifikace

Délka-L[mm]	Šířka-b[mm]	Tloušťka- a[mm]
160	20	1,6



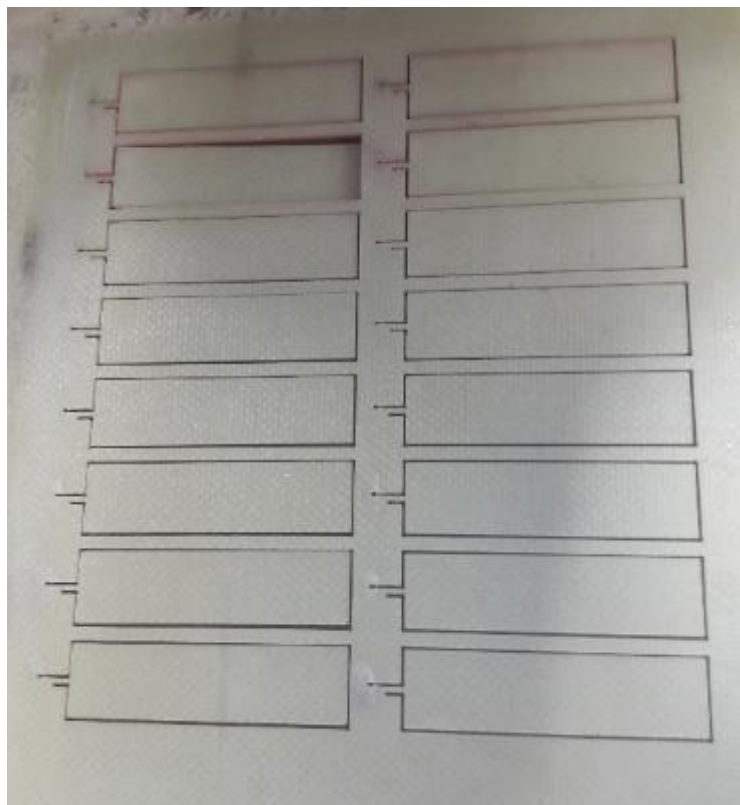
Obr. 34 Schéma vrstvení u vzorku č.6

### 4.2.3 Řezání zkušebních těles

Z důvodu řezání zkušebních těles muselo být použito technologie řezání vodním paprskem, u konvenčních metod řezání se pracuje s vyššími teplotami, a to je u kompozitních materiálů nežádoucí. U technologie řezání vodním paprskem je hlavní veličinou tlak paprsku, proto zde nevzniká vysoká teplota.

#### 4.2.3.1 Řezání materiálu vysokotlakým vodním paprskem

Hlavní podstatou této metody je dělení materiálu principem obrušování děleného materiálu tlakem za pomoci vodního paprsku. Pracovní tlak vody se pohybuje v rozmezí 800–4100 Bar. Hlavním tlakovým zdrojem jsou vysokotlaká čerpadla, která mají příkon 9–75 kW a průtok vody 1,2 – 7,6 l/min. Vodní paprsek je soustředěn v řezací hlavě zakončeny vodní tryskou. Pohyb řezací hlavy, tedy i celá dráha řezu je řízena číslicově řízenými stroji podle předem určeného programu. Je možné provádět i tvarově složitější řezy během jedné operace. Standartní přesnost výřezu je  $\pm 0,2$  mm/m. Materiál, který je dělen není silově namáhán, tudíž řezná hrana není nijak tepelně namáhána. Vždy u dělení vodním paprskem se jedná o studený řez. Tato skutečnost bývá důležitým a hlavním faktorem, který odlišuje vodní paprsek od technologií ostatních, zvláště pak od mikroplazmy či laseru. Po provedení řezu se směs vody a případně abraziva zachycuje v lapači, který je umístěn pod řezaným materiálem.



*Obr. 35 Ukázka nařezaných zkušebních těles*

## 5 EXPERIMENTÁLNÍ ZJIŠTĚNÍ MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ

### 5.1 Statická zkouška ohybem

Na začátku je potřeba provést statickou zkoušku jednoosého tříbodového ohybu, ze kterého zjistíme všechny potřebné materiálové charakteristiky jako je mez pevnosti, modul pružnosti a maximální ohybová síla. Tyto zkoušky probíhaly na zkušebním stroji ZWICK 1456, který je součástí laboratoře na Fakultě technologické. Stroj je určen pro statické i nízkocyklové dynamické zkoušky v tahu, tlaku, ohybu a smyku. Výsledky měření lze uplatnit v odvětvích jako je výzkum, vývoj či kontrola kvality. Měření a vyhodnocení zkoušky pak bylo zpracováno pomocí softwaru TestXpert. Součástí zkušebního stroje je i klimatická komora, která umožňuje testování za různých teplotních podmínek.

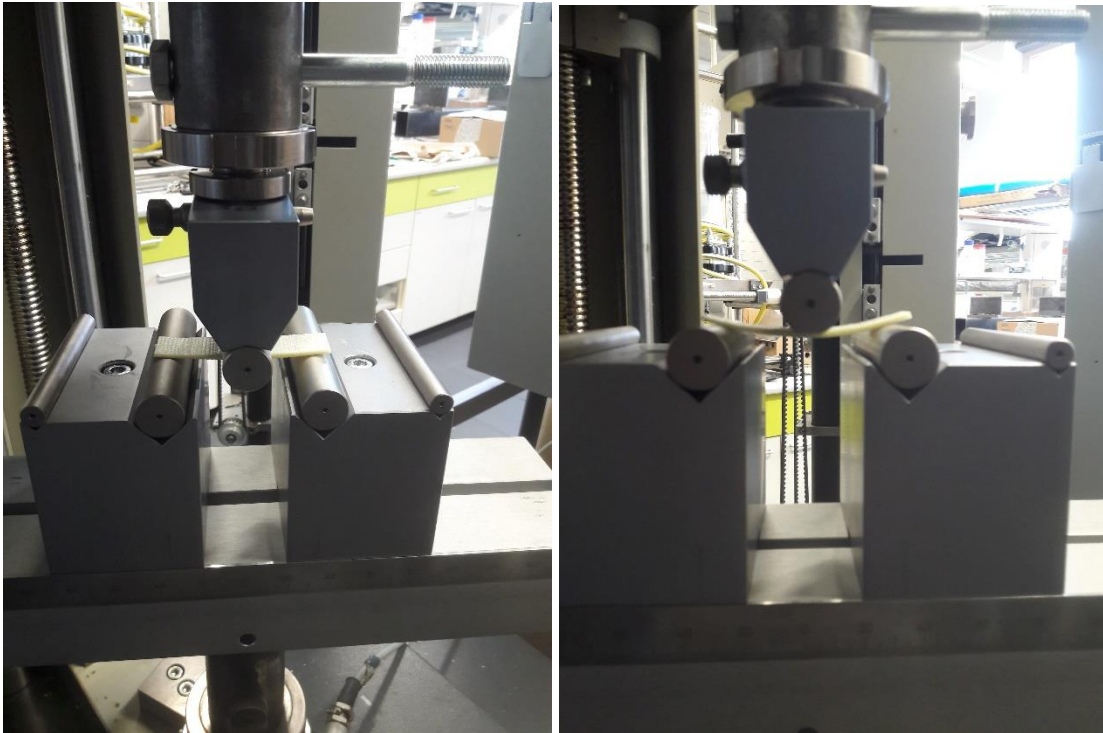
Parametry stroje ZWICK 1456:

- Celková výška: 2012mm
- Celková šířka: 630mm
- Strojová výška: 1284mm
- Pracovní šířka: 420mm
- Rozpětí běžných čelistí: 15mm
- Hmotnost: 150kg
- Maximální zkušební síla: 100kN



Obr. 36 Zkušební přístroj ZWICK 1456

U vzdálenosti podpěr statického zatížení byla stanovena hodnota  $L_p = 68 \text{ mm}$ . Rádus trnu u tohoto zatížení má hodnota  $R = 5 \text{ mm}$ , stejně jako u rádiusů podpěr.



Obr. 37 Ukázka statické zkoušky před a po zatížení

V následujících tabulkách jsou vyhodnocovány tyto parametry:

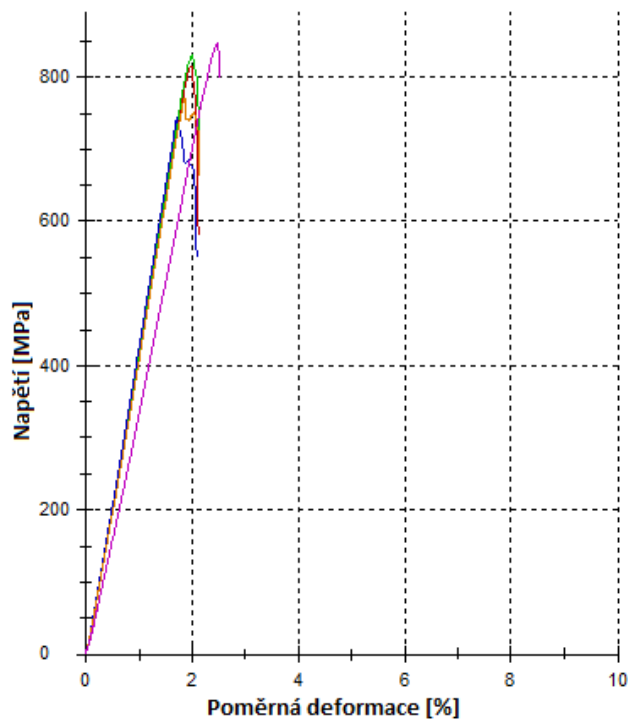
- $E$  – modul pružnosti v ohybu [MPa]
- $F_{max}$  – maximální síla [N]
- $\sigma_{Fmax}$  – mez pevnosti v ohybu [MPa]
- $\varepsilon_{Fmax}$  – poměrná deformace na mezi pevnosti [%]
- $y_{Fmax}$  – průhyb při mezi pevnosti [mm]
- $W_{Fmax}$  – práce potřebná na dosažení maximální síly [J]

### 5.1.1 Vzorek č.1

Zkušební vzorky byly zatěžovány a namáhány na tah a jelikož se jedná o tělesa s rovnoměrným vrstvením bez překladů jsou hodnoty jako modul pružnosti v tahu, maximální síla a meze pevnosti nejvyšší z daných vzorků.

Tab. 10 Naměřená a vyhodnocená data pro vzorky č.1

Vzorek č.1 n=5	$E$ [MPa]	$\sigma_{Fmax}$ [MPa]	$F_{max}$ [N]	$\varepsilon_{Fmax}$ [%]	$y_{Fmax}$ [mm]	$W_{Fmax}$ [N.mm <sup>2</sup> ]
Těleso 1.1	39100	815	1690	2,1	4,9	4174,86
Těleso 1.2	39800	821	1730	2,1	4,9	4275,85
Těleso 1.3	40700	750	1550	2,1	4,2	3197,77
Těleso 1.4	38600	775	1600	2,1	4,6	3651,61
Těleso 1.5	37900	847	1760	2,5	6,1	5337,88
Průměr	37840	801,6	1666	2,18	4,94	4127,59
Směrodatná odchylka	3492,05	34,60	79,15	0,16	0,63	718,35
Variační koeficient [%]	9,22	4,32	4,75	1,28	12,75	17,41



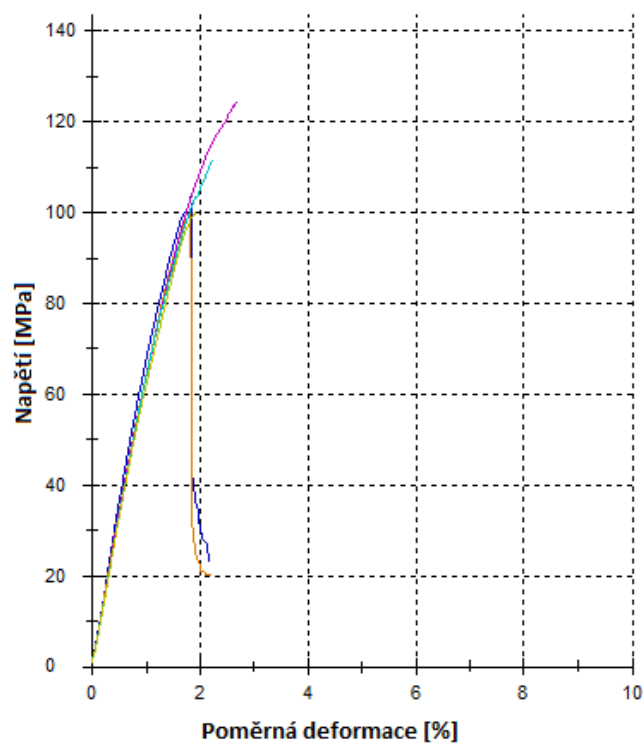
Obr. 38 Závislost napětí na poměrné deformaci pro vzorky č.1

### 5.1.2 Vzorek č.2

Tyto zkušební vzorky byly vrstveny podle schématu (Obr.30), kde tloušťka nebyla konstantní, ale měnila se podle schématu. Hodnoty jsou uvedeny v Tab. 11.

Tab. 11 Naměřená a vyhodnocená data pro vzorky č.2

Vzorek č.2 n=5	$E$ [MPa]	$\sigma_{Fmax}$ [MPa]	$F_{max}$ [N]	$\varepsilon_{Fmax}$ [%]	$y_{Fmax}$ [mm]	$W_{Fmax}$ [N·mm <sup>2</sup> ]
Těleso 2.1	6830	98,2	215	2,2	4,5	552,82
Těleso 2.2	6700	99,2	217	2,2	4,1	504,39
Těleso 2.3	6190	123,2	258	2,7	6,6	1030,08
Těleso 2.4	6300	109,3	242	2,2	5	705,23
Těleso 2.5	6340	94,9	217	1,9	4,3	526,92
Průměr	6472	104,96	229,8	2,24	4,9	663,88
Směrodatná odchylka	247,66	10,31	17,28	0,26	0,90	196,13
Variační koeficient [%]	3,82	9,82	7,51	11,50	18,39	29,54



Obr. 39 Závislost napětí na poměrné deformaci pro vzorky č.2

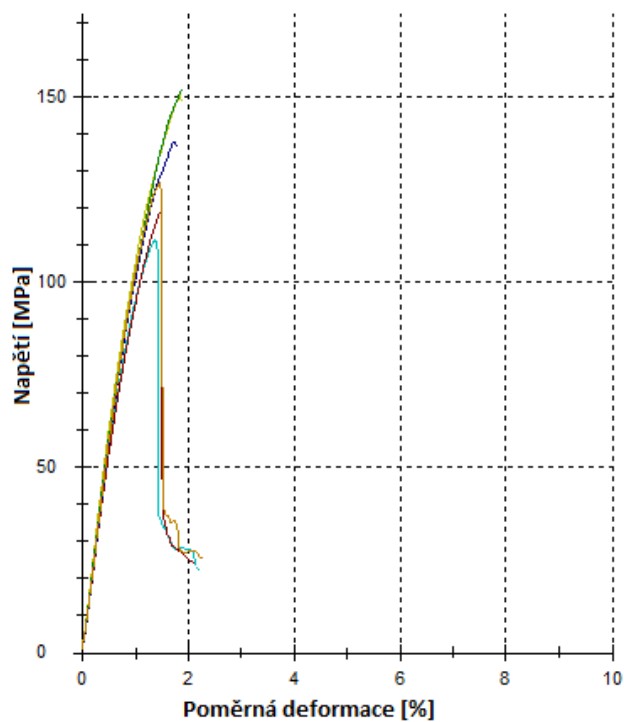


### 5.1.3 Vzorek č.3

U zkušebních vzorků č.3 bylo vrstvení provedeno podle schématu (Obr.31), kde tloušťka byla konstantní. Hodnoty jsou uvedeny v tabulce (Tab.12).

Tab. 12 Naměřená a vyhodnocená data pro vzorky č.3

Vzorek č.3 n=5	$E$ [MPa]	$\sigma_{Fmax}$ [MPa]	$F_{max}$ [N]	$\varepsilon_{Fmax}$ [%]	$y_{Fmax}$ [mm]	$W_{Fmax}$ [N. mm <sup>2</sup> ]
Těleso 3.1	12100	118	312	1,9	4,6	869,54
Těleso 3.2	10600	107	247	2,1	3,6	525,16
Těleso 3.3	11700	128	330	1,9	4,3	842,75
Těleso 3.4	11200	137	299	1,8	3,9	697,48
Těleso 3.5	11100	153	275	2,3	3,3	530,75
Průměr	11340	128,6	292,6	2	3,94	693,13
Směrodatná odchylka	516,14	15,78	29,00	0,18	0,47	147,04
Variační koeficient [%]	4,55	12,27	9,91	8,94	11,86	21,21



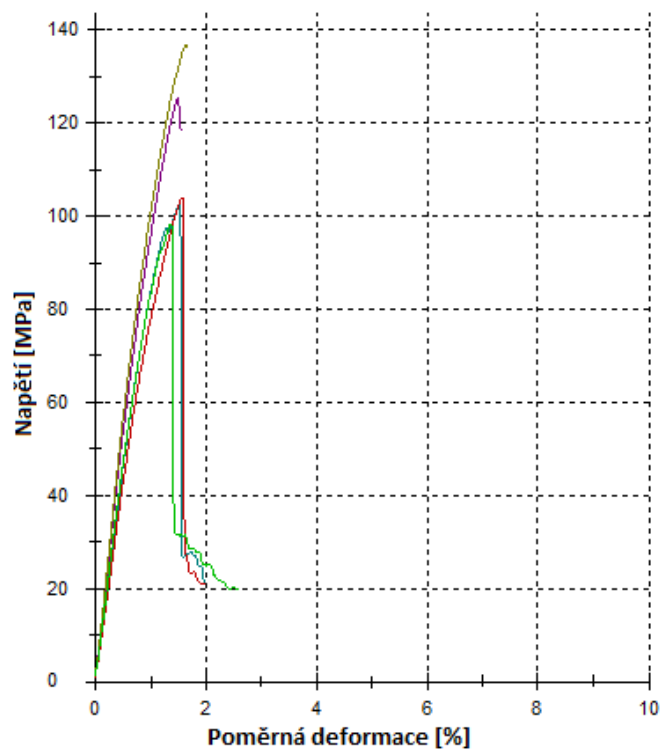
Obr. 40 Závislost napětí na poměrné deformaci pro vzorky č.3

### 5.1.4 Vzorek č.4

Zkušební vzorky byly vrstveny dle schématu (Obr. 32). Kde i u této modifikace byla tloušťka konstantní. Hodnoty jsou uvedeny v tabulce (Tab.13).

Tab. 13 Naměřená a vyhodnocená data pro vzorky č.4

Vzorek č.4 n=5	$E$ [MPa]	$\sigma_{Fmax}$ [MPa]	$F_{max}$ [N]	$\varepsilon_{Fmax}$ [%]	$y_{Fmax}$ [mm]	$W_{Fmax}$ [N. mm <sup>2</sup> ]
Těleso 4.1	10500	124,2	260	1,5	3,7	544,7
Těleso 4.2	8760	104,1	224	2	3,5	467,53
Těleso 4.3	11100	137,8	284	1,6	4,1	676,07
Těleso 4.4	8120	103,2	225	2	3,6	465,64
Těleso 4.5	9190	97,7	213	2,6	3,1	382,39
Průměr	9534	113,4	241,2	1,94	3,6	507,266
Směrodatná odchylka	1104,75	15,16	26,60	0,39	0,32	98,79
Variační koeficient [%]	11,59	13,37	11,03	19,99	8,96	19,48



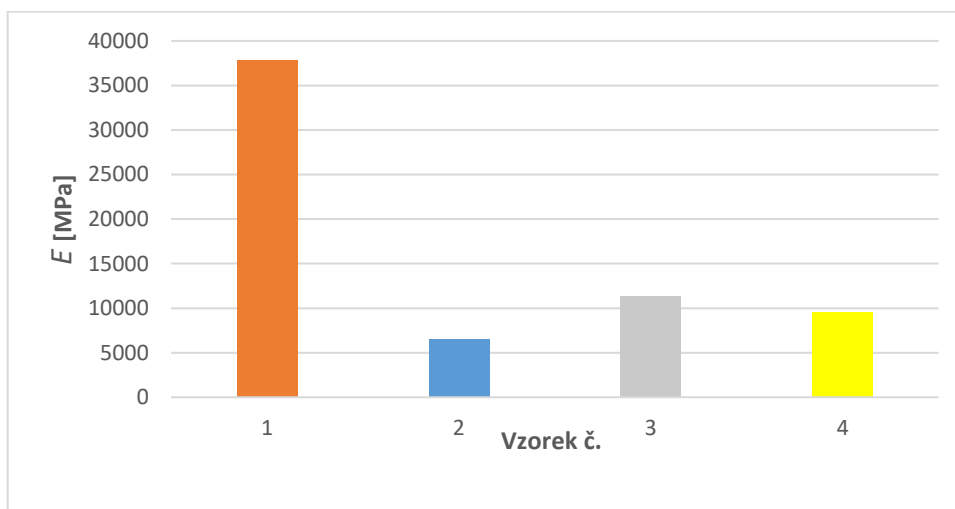
Obr. 41 Závislost napětí na poměrné deformaci pro vzorky č.4

### 5.1.5 Porovnání mechanických vlastností vzorků č.1, č.2, č.3 a č.4 v ohybu

V tabuTab.14 můžeme vidět průměrné hodnoty jednotlivých skupin zkušebních vzorků. Jsou zde uvedené hodnoty modulu pružnosti v ohybu, mez pevnosti v ohybu a maximální síla. Nejlepších hodnot dosahují zkušební tělesa vzorku č.1, kde nebylo použito vrstvení jednotlivých odstřížků, ale byly kladeny rovnoměrně na sebe. Rozměry zkušebních vzorků byly 80x20mm.

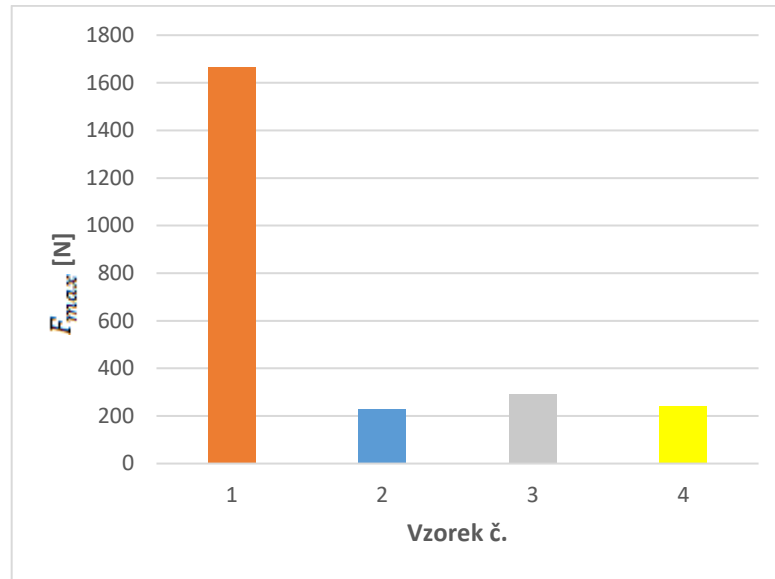
Tab. 14 Výsledné hodnoty pro jednotlivé vzorky u statického tříbodového ohybu

Vzorek č.	$E$ [MPa]	$\sigma_{Fmax}$ [MPa]	$F_{max}$ [N]
1	37840 ± 3492	801,6 ± 34,6	1666 ± 79,2
2	6472 ± 248	105,0 ± 10,3	229,8 ± 17,3
3	11340 ± 516	128,6 ± 15,8	292,6 ± 29,0
4	9534 ± 1105	113,4 ± 15,2	241,2 ± 26,6



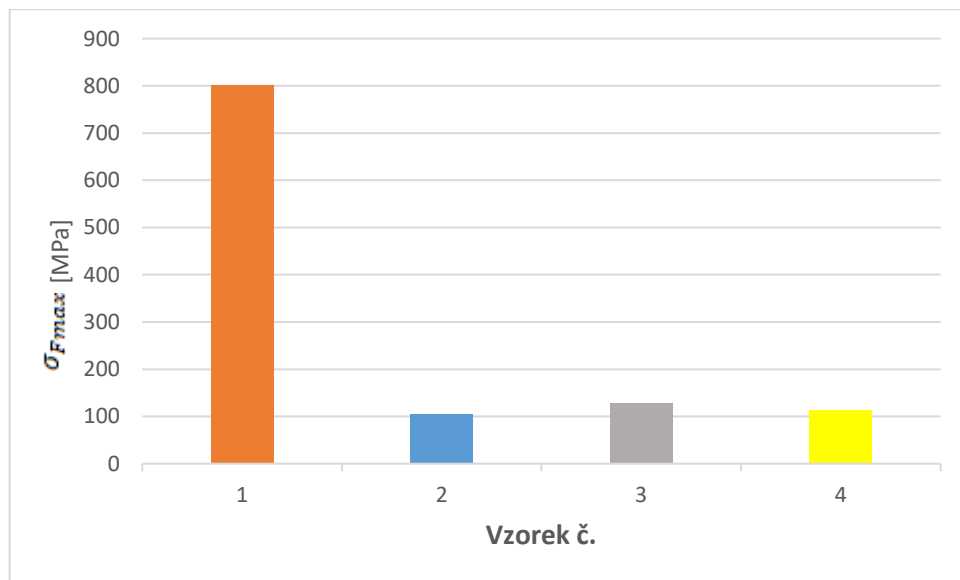
Obr. 42 Grafické znázornění hodnot modulů pružnosti v ohybu

Modul pružnosti v ohybu měl u zkušebních těles vzorku č.1 hodnotu  $E = 37\,840$ , kde tato hodnota byla nejméně 3x vyšší než u zkušebních těles ostatních vzorků.



Obr. 43 Grafické znázornění hodnot maximálních sil

Taktěž u maximální síly potřebné k přetržení zkušebního tělesa vykazují hodnoty minimálně 5x vyšší než u ostatních vzorků. Rozdíly mezi vzorky č.2, č.3 a č.4 nejsou tak radikálně rozdílné oproti rozdílu se vzorky č.1, ale vzorek č.3 dosahuje lepší odolnost proti působící síle o 50 N než vzorky č.2 a vzorky č.4.



Obr. 44 Grafické znázornění hodnot pro mez pevnosti v ohybu

U meze pevnosti v ohybu hodnoty vzorků č.1 ukazují taktěž 5x vyšší než hodnoty u ostatních zkušebních vzorků.

### 5.1.6 Shrnutí mechanických vlastností v ohybu

U statických zkoušek, které byly vyhodnoceny, jsme zjistili, že vrstvení jednotlivých odstřížků s následným překládáním jednotlivých vrstev má znatelný vliv na hodnoty jako jsou modul pružnosti v ohybu, mez pevnosti v ohybu a v neposlední řadě maximální sílu důležitou k porušení materiálu. U vzorku č.2 bylo zjištěno, že nevykazuje velký rozdíl v naměřených hodnotách, když je zkušební těleso položeno vrstvením nahoru či dolů při vykonávání statické zkoušky. Lze předpokládat, že výsledky by mohli být jiné, kdyby nebylo vrstvení vždy prováděno uprostřed zkušebních těles.

## 5.2 Statická zkouška tahem

Abychom mohli porovnávat únavové chování, musíme nejprve zjistit materiálové vlastnosti pomocí statické zkoušky v tahu. Z této zkoušky zjistíme veličiny jako jsou modul pružnosti v tahu, mez pevnosti a maximální sílu potřebnou k přetržení. Tyto zkoušky probíhaly v prostorách Univerzity Tomáše Bati v laboratoři na Fakultě aplikované informatiky. Zkušební stroj byl použit Vibrophore 1000 značky Zwick/Roell. Tento stroj představuje poslední generaci vysokofrekvenčních pulsátorů. Lze jej využít i jako plnohodnotný statický testovací stroj a taktéž slouží k testování únavové životnosti. Vyhodnocení probíhalo za pomoci softwaru TestXpert.

Parametry stroje Vibrophore 1000:

- Maximální síla: 1000kN
- Maximální amplituda síly: 500kN
- Maximální oscilační posun: 4 ( $\pm 2$ ) mm
- Testovací frekvenční rozsah: 30-285 Hz
- Maximální testovací výška: 2005mm



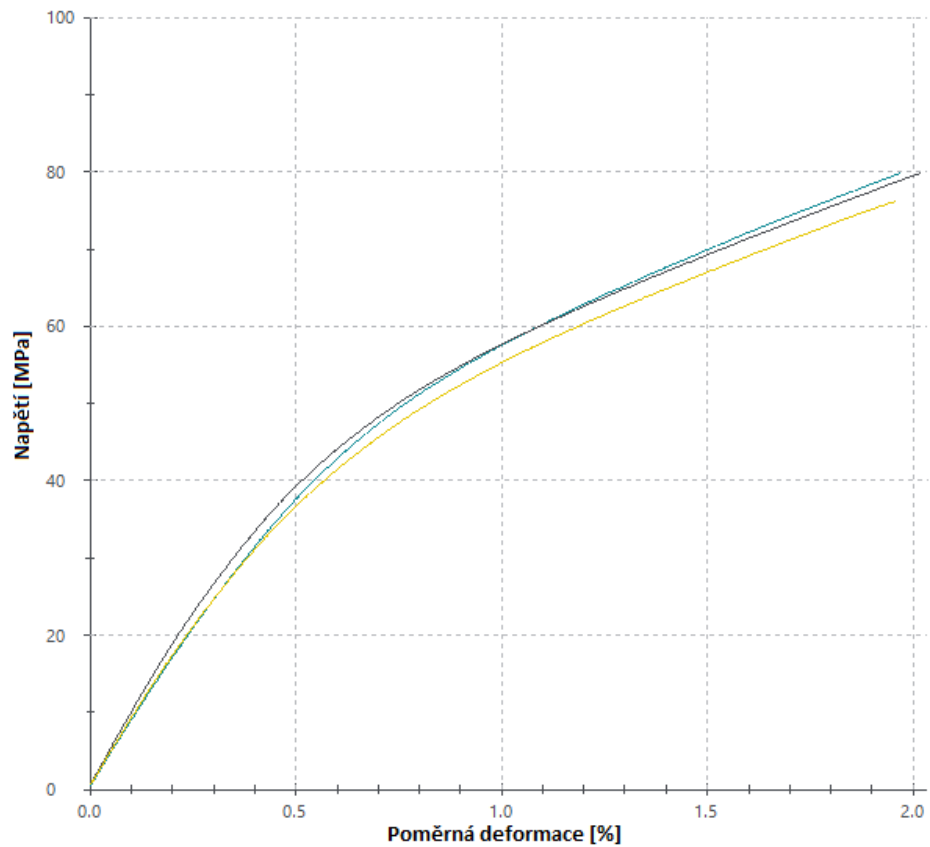
Obr. 45 Zkušební stroj pro statické i dynamické zatěžování Vibrophore 1000

### 5.2.1 Vzorek č.5

U zkušebních těles vzorků č.5 bylo vrstvení provedeno podle schématu (Obr.33), kde prostřední vrstva je narušená. Hodnoty jsou uvedeny v tabulce (Tab.15).

Tab. 15 Naměřená a vyhodnocená data pro vzorky č.5

Vzorek č.5 n=3	$E$ [MPa]	$\sigma_{Fmax}$ [MPa]	$F_{max}$ [N]	$\varepsilon_{Fmax}$ [%]	$y_{Fmax}$ [mm]	$W_{Fmax}$ [N.mm <sup>2</sup> ]
Těleso 5.1	8070	79,77	2552,6	2	1,8	3090,39
Těleso 5.2	8750	79,78	2552,8	2	1,9	3229,74
Těleso 5.3	8060	76,10	2435,1	1,9	1,9	2953,04
Průměr	8293,34	78,55	2513,5	1,97	1,86	3091,06
Směrodatná odchylka	322,94	1,73	55,44	0,05	0,05	112,96
Variační koeficient [%]	3,89	2,21	2,21	2,40	2,53	3,65



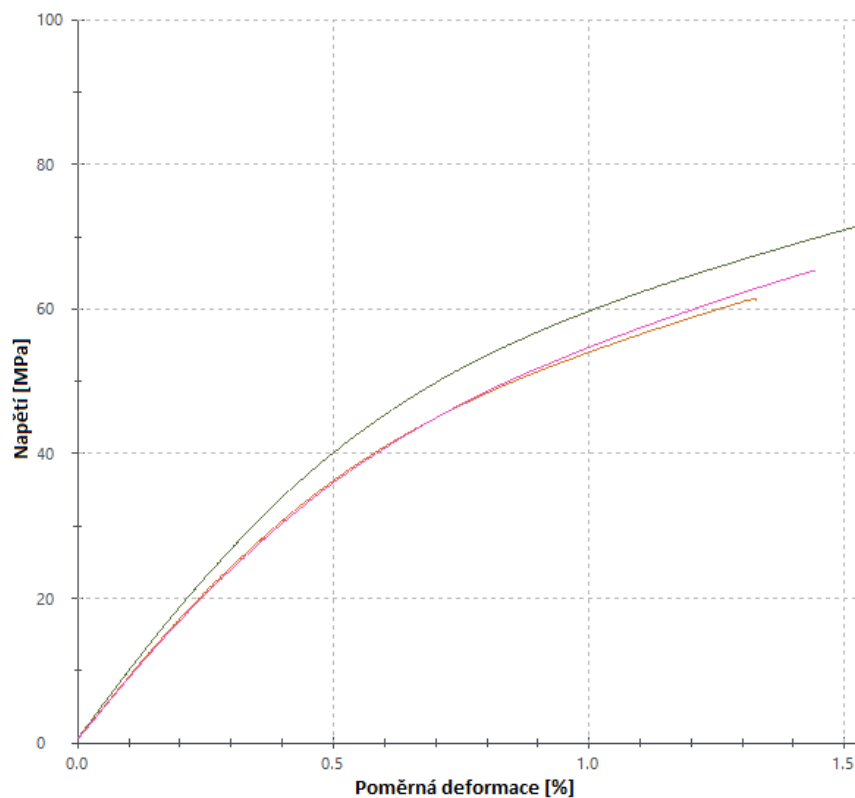
Obr. 46 Závislost napětí na poměrné deformaci pro vzorky č.5

### 5.2.2 Vzorek č.6

Zkušební tělesa vzorků č.6 jsou vrstvena dle schématu (Obr.34). Toto vrstvení je překládáno uprostřed přes dvě vrstvy. Hodnoty jsou uvedeny v tabulce (Tab.16).

Tab. 16 Naměřená a vyhodnocená data pro vzorky č.6

Vzorek č.6 n=3	$E$ [MPa]	$\sigma_{Fmax}$ [MPa]	$F_{max}$ [N]	$\varepsilon_{Fmax}$ [%]	$y_{Fmax}$ [mm]	$W_{Fmax}$ [N. mm <sup>2</sup> ]
Těleso 6.1	8780	71,57	2290,3	1,5	1,8	2182,29
Těleso 6.2	7980	61,48	1967,5	1,3	1,7	1582,41
Těleso 6.3	7880	65,35	2091,2	1,4	1,8	1816,28
Průměr	8213,34	66,14	2116,34	1,4	1,77	1860,33
Směrodatná odchylka	402,77	4,16	132,98	0,08	0,05	246,87
Variační koeficient [%]	4,90	6,28	6,28	5,83	2,67	13,27



Obr. 47 Závislost napětí na poměrné deformaci pro vzorky č.6

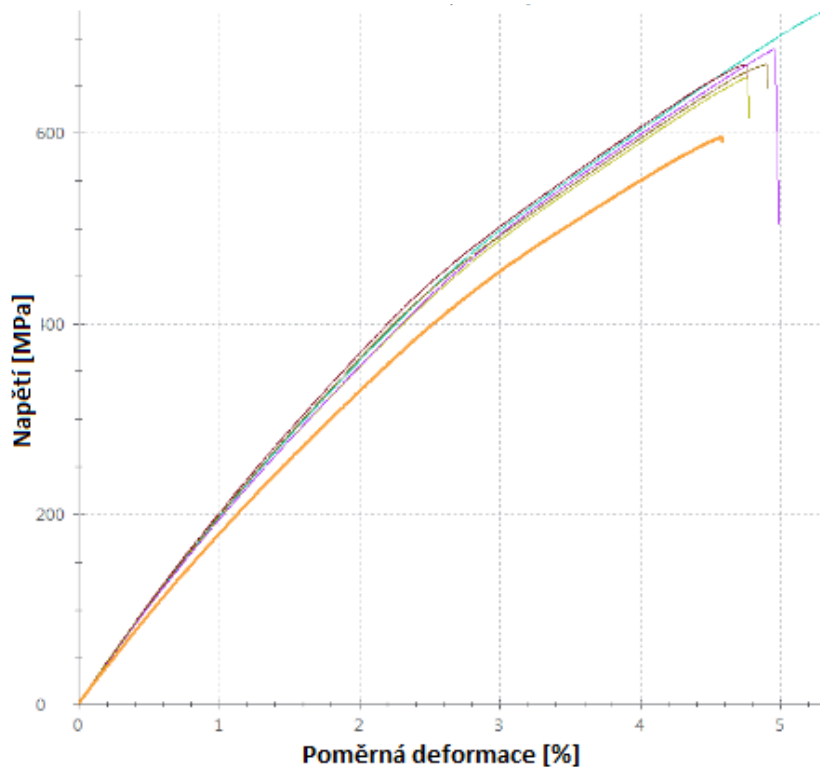
### 5.2.3 Vzorek k porovnání mechanických a dynamických vlastností pro vzorky č.5 a vzorky č.6

Z časových důvodů bylo využito naměřených hodnot studenta Bc. Zbyňka Bártů, který měřil srovnání jednotlivých druhů prepregů a porovnával je. Tyto data byly použity pro srovnání mechanických a dynamických vlastností daného vzorku se vzorky č.5 a vzorky č.6, které mají stejné rozměry, avšak vrstvení je jiné (dle schémat). Použité hodnoty se rovnají rovnoměrnému vrstvení, tak jako je znázorněno na schématu vzorku č.1. Tyto vzorky jsou skládány taktéž jako vzorky č.5 a vzorky č.6 z pěti vrstev odstrižků.



Tab. 17 Naměřena a vyhodnocená data pro vzorky určených k porovnání mechanických a dynamických dat

Vzorek k porovnání n=3	$E$ [MPa]	$\sigma_{Fmax}$ [MPa]	$F_{max}$ [N]	$\varepsilon_{Fmax}$ [%]	$y_{Fmax}$ [mm]	$W_{Fmax}$ [N. mm <sup>2</sup> ]
Těleso VP.1	18900	595,59	18868	4,6	2,8	30035,72
Těleso VP.2	20800	728,46	23078	5,3	3,2	42965,54
Těleso VP.3	21100	672,1	21292	4,8	2,9	35611,93
Těleso VP.4	20700	658,96	20876	4,8	2,9	34589,14
Těleso VP.5	20600	688,23	21803	5	3	37428,29
Těleso VP.6	20900	672,25	21297	4,9	2,9	36721,61
Průměr	20820	684,00	21669,2	4,96	2,98	3091,06
Směrodatná odchylka	172,05	24,09	763,23	0,19	0,12	112,96
Variační koeficient [%]	0,0083	0,0352	0,0352	0,0374	0,0391	3,65



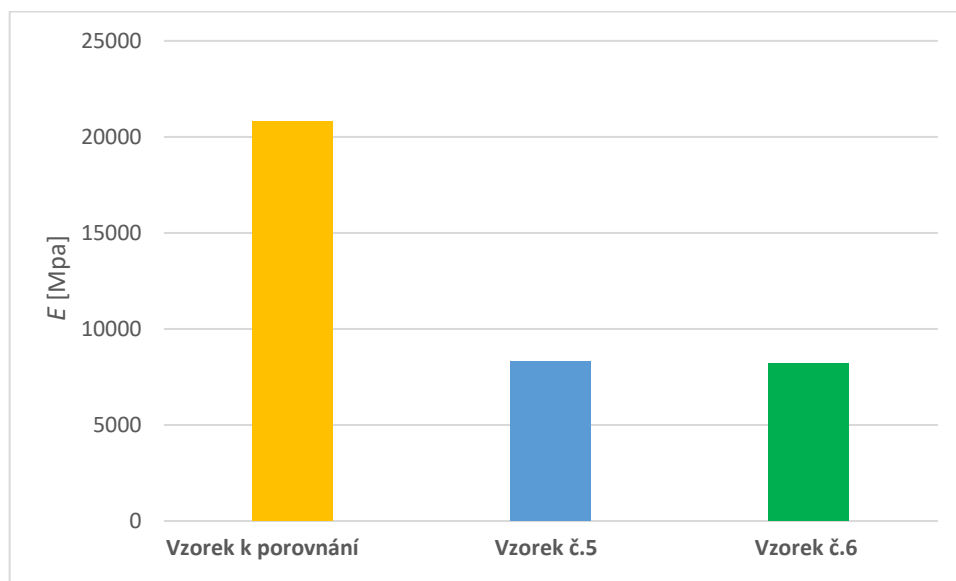
Obr. 48 Závislost napětí na poměrné deformaci pro vzorky k porovnání

#### 5.2.4 Porovnání mechanických vlastností vzorků č.5, č.6 a vzorků k porovnání v tahu

V tabulce (Tab.18) jsou výsledné průměrné hodnoty jednotlivých skupin zkušebních vzorků, kde mezi uvedené hodnoty patří modul pružnosti v tahu, mez pevnosti v tahu a maximální síla. Nejlepších výsledků opět dosahoval zkušební vzorek k porovnání, kde u tohoto vzorku nebylo použito žádné překládání jednotlivých vrstev. Rozměry zkušebních těles byly 160x20.

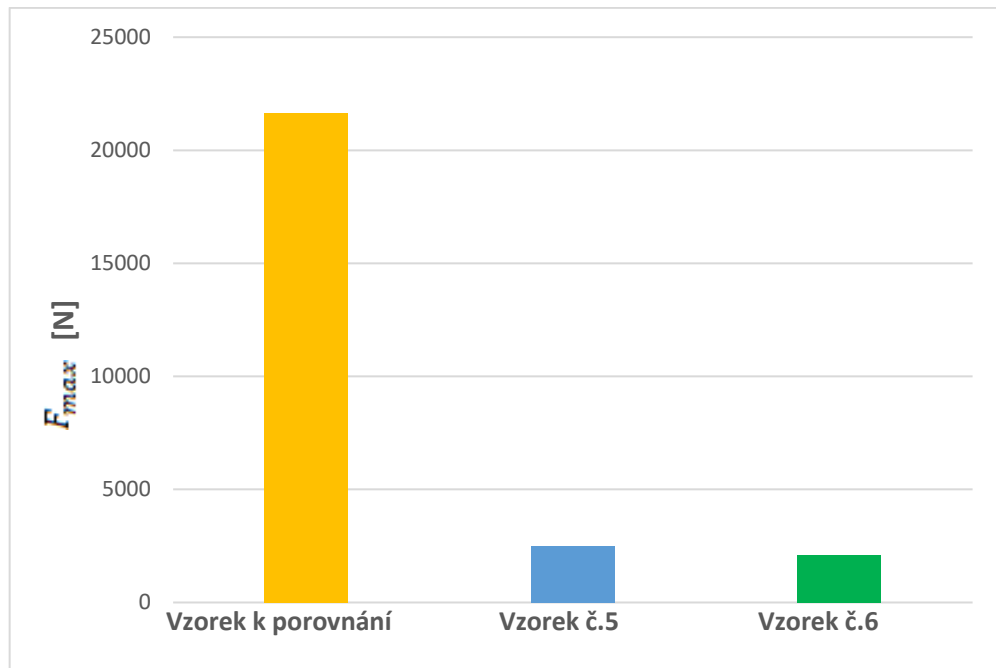
Tab. 18 Výsledné hodnoty pro jednotlivé vzorky u zkoušky statického tahu

Vzorek	$E$ [MPa]	$\sigma_{Fmax}$ [MPa]	$F_{max}$ [N]
<b>K porovnání</b>	20820 ± 172,0	684,0 ± 24,1	21669,2 ± 763,2
<b>Č.5</b>	8293,3 ± 322,9	78,6 ± 1,7	2513,5 ± 55,4
<b>Č.6</b>	8213,3 ± 402,8	66,1 ± 4,2	2116,3 ± 133,0



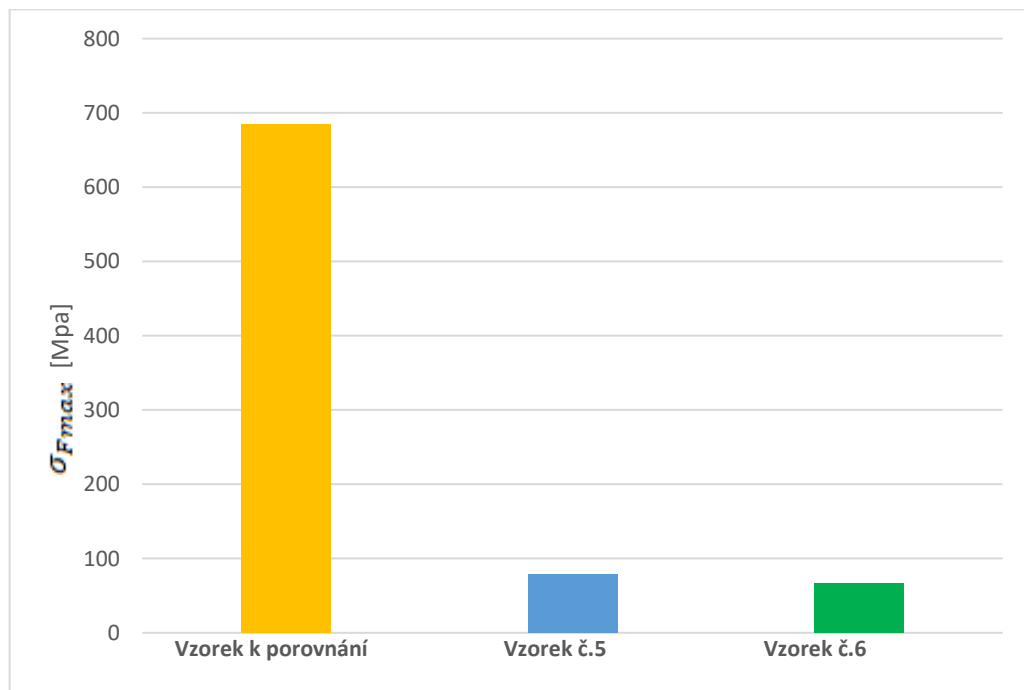
Obr. 49 Grafické znázornění hodnot modulu pružnosti v tahu

Modul pružnosti v tahu vyšel nejvyšší u skupiny vzorků k porovnání, kde hodnota  $E = 20820$  MPa byla vyšší více než 2x oproti dalším měřeným vzorkům.



Obr. 50 Grafické znázornění hodnot maximálních sil

U maximální síly, která je potřebná k přetržení zkušební vzorku lze vidět, že i zde vykazuje vzorek k porovnání vyšších hodnot. Tato hodnota je oproti vzorkům č.5 a č.6 téměř 10x vyšší.



Obr. 51 Grafické znázornění hodnot mezí pevností v tahu

Mez pevnosti v tahu je u vzorků č.5 a vzorků č.6 poměrně přibližná, ale oproti vzorku určenému k porovnání je tato hodnota nižší skoro 10x.

### 5.2.5 Shrnutí mechanických vlastností v tahu

U tohoto zhodnocení lze jasně vidět, že vrstvení prepregů překládáním má jasný vliv na mechanické vlastnosti daného materiálu. Jelikož jen u vzorku použitého k porovnání jsou vrstvy kladeny rovnoměrně na sebe po směru hlavního vlákna, mají tyto vzorky všechny hodnoty vysoké oproti vzorkům ostatním. U těchto zkušebních těles se hodnoty lišily téměř desetinásobně, a to je v praxi nepříznivý vliv pro aplikaci takto překládaných vrstvení. Nutno podotknout, že k přetržení došlo vždy v místě překladů.



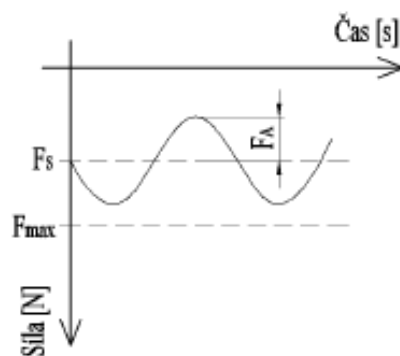
Obr. 52 Jednotlivé vzorky po statických zkouškách

## 6 EXPERIMENTÁLNÍ ZJIŠTĚNÍ DYNAMICKÉHO NAMÁHÁNÍ

Dynamická zkouška byla prováděna taktéž jako statická zkouška v tahu v laboratoři na Fakultě aplikované informatiky. I pro tyto zkoušky byl použit zkušební stroj Vibrophore 1000. Tento stroj plně vyhovuje zkouškám cyklického namáhání. Zkoušky byly prováděny cyklickým zatížením v tahu. Parametry stroje jsou uvedeny v kapitole 5.2.

### 6.1 Parametry zkoušky

Před samotným provedení zkoušky bylo pomocí softwaru TestXpert v programu test controller simulováno měření, kde si stroj sám vyhodnotil, jaká frekvence bude pro měření optimální. Zatížení pak bylo zadáváno dle hodnot statické zkoušky.



Obr. 53 Průběh zatěžování je sinusový

Tab. 19 Parametry pro zatěžování vzorků č.5

Vzorek č.5	80 %	70 %	60 %
Horní mez zatěžující síly	2008 N	1757 N	1506 N
Dolní mez zatěžující síly	200 N	200 N	200 N
Frekvence	33,3 Hz	33,2 Hz	33,2 Hz

Tab. 20 Parametry pro zatěžování vzorků č.6

Vzorek č.6	80 %	70 %	60 %
Horní mez zatěžující síly	1688 N	1477 N	1266 N
Dolní mez zatěžující síly	200 N	200 N	200 N
Frekvence	33,1 Hz	33,1 Hz	33,1 Hz

## 6.2 Dynamická zkouška tahem

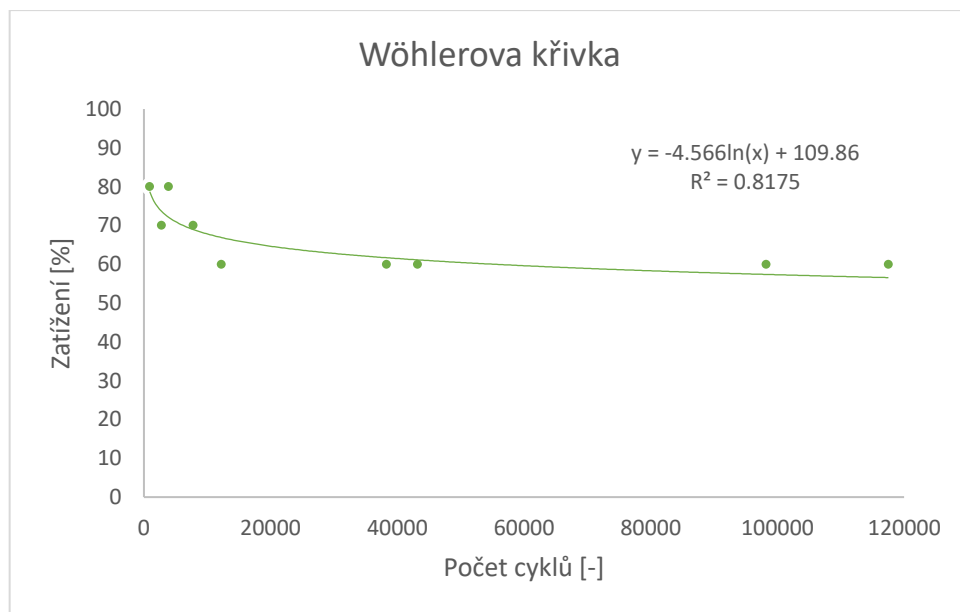
Při měření cyklů byl vždy zkušební vzorek vystaven předem danému zatížení a byl vždy testován na maximální počet cyklů dosažených k přetržení daného zkušebního vzorku. Po přetržení vzorku byl zapsán počet dosažených cyklů. Zatěžování probíhalo na 80 %, 70 % a 60 % z maximální zatěžující síly dosažené statickou zkouškou.

### 6.2.1 Vzorek č.5

U vzorků č.5 probíhalo zatěžování z  $F_{max} = 2510$  N. Zatěžování probíhalo ve třech hladinách.

Tab. 21 Tabulka počtu cyklů při daném zatížení pro vzorky č.5

Vzorek č.5							
Zatížení	Hodnota	Počet cyklů					Průměr
80 % $F_{max}$	2008 N	1021	1112	980	3900	920	1582
70 % $F_{max}$	1757 N	3150	3751	17800	3180	2800	6136
60 % $F_{max}$	1506 N	98200	43222	117525	12222	38311	61900



Obr. 54 Wöhlerova křivka pro vzorky č.5

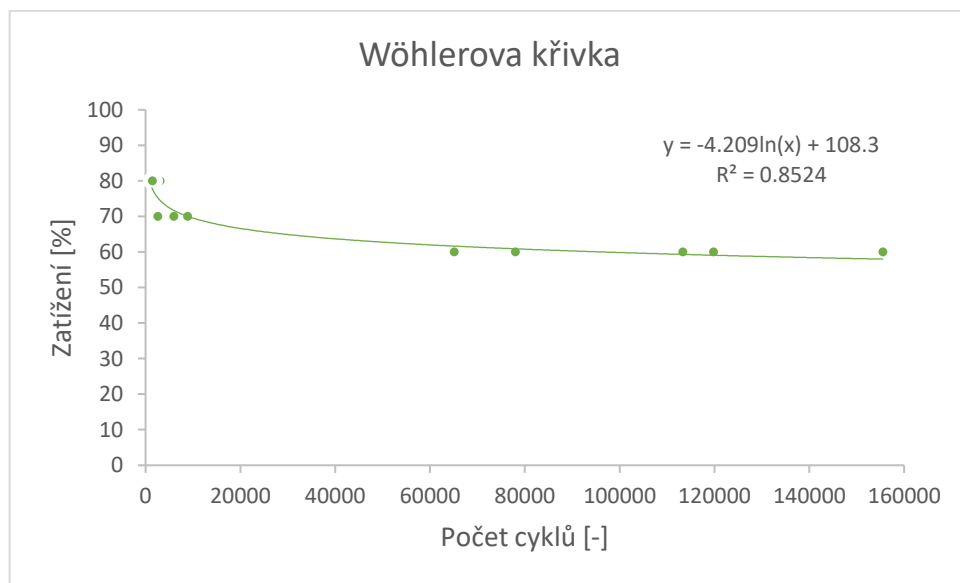
Na Wöhlerově křivce pro vzorky č.5 lze vidět závislost zatížení na počtu cyklů, které tyto vzorky dosáhly před porušením.

**6.2.2 Vzorek č.6**

Vzorky č.6 byly zatěžovány z  $F_{max} = 2110$  N. Tyto vzorky byly taktěž zatěžovány ve třech hladinách.

Tab. 22 Tabulka počtu cyklů při daném zatížení pro vzorky č.6

Vzorek č.6							
Zatížení	Hodnota	Počet cyklů					Průměr
80 % $F_{max}$	1688 N	1450	1898	1555	3101	1352	1871
70 % $F_{max}$	1477 N	8875	6000	2812	2650	2618	4591
60 % $F_{max}$	1266 N	115555	14026	103330	95142	19875	69586



Obr. 55 Wöhlerova křivka pro vzorky č.6

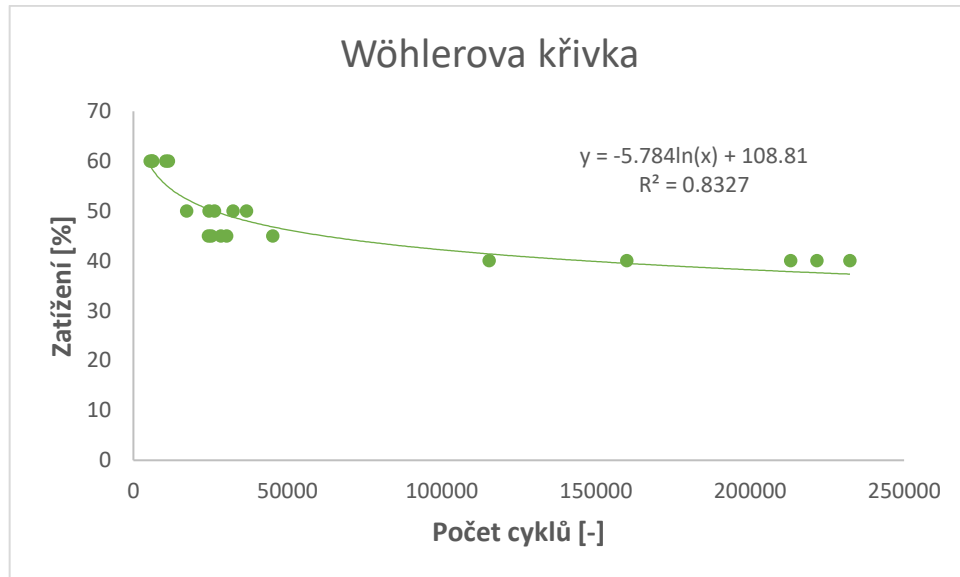
Wöhlerova křivka životnosti nám ukazuje kolik vydrželi vzorky č.6 cyklů před porušením

**6.2.3 Vzorek k porovnání**

Tyto vzorky byly namáhány v hladinách 60 %, 50 %, 45 % a 40 % z  $F_{max} = 21200$  N.

Tab. 23 Tabulka počtů cyklů při daném zatížení u vzorků k porovnání

Vzorek k porovnání							
Zatížení	Hodnota	Počet cyklů					Průměr
60 %	12 720 N	6236	5399	11312	10518	6044	7902
50 %	10 600 N	26333	32331	17929	36672	24508	27555
45 %	9540 N	45210	25317	28393	30270	24293	30697
40 %	8480 N	213241	232451	115368	221735	160076	188574



Obr. 56 Wöhlerova křivka pro vzorky k porovnání

Wöhlerova křivka nám ukazuje závislost jednotlivých hladin zatížení na počtu cyklů, které vzorky vydržely do přetržení.

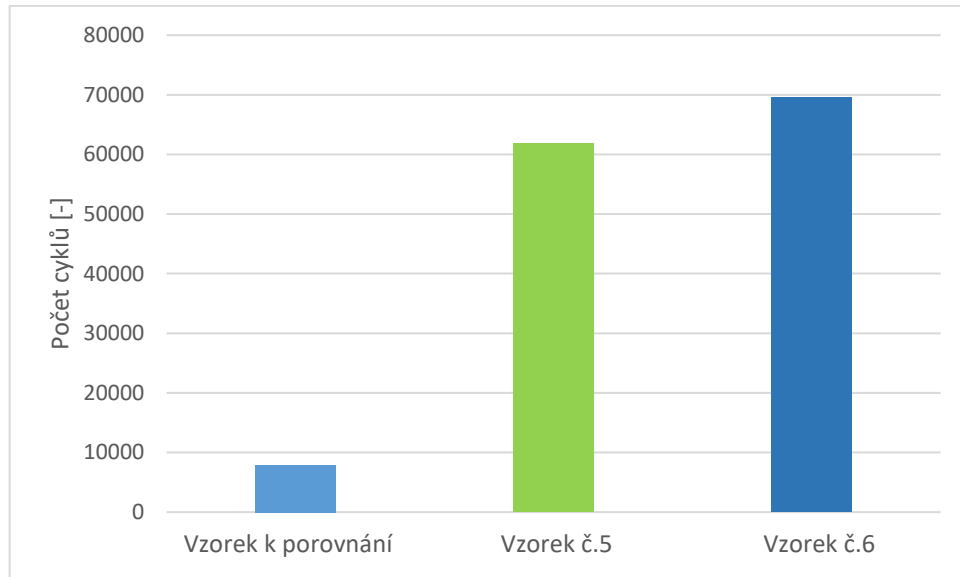
### 6.3 Porovnání jednotlivých zkušebních vzorků

V tabulce (Tab.24) je znázorněno kolik vydržely dané skupiny vzorků cyklů při zatěžování na 60 % z  $F_{max}$ . Jak lze vidět hodnoty vzorků k porovnání vykazují znovu úplně jiné hodnoty než vzorky s vrstvením jednotlivých odstrižků překládáním.

Tab. 24 Hodnoty zatěžujících sil a počtu cyklů u jednotlivých vzorků

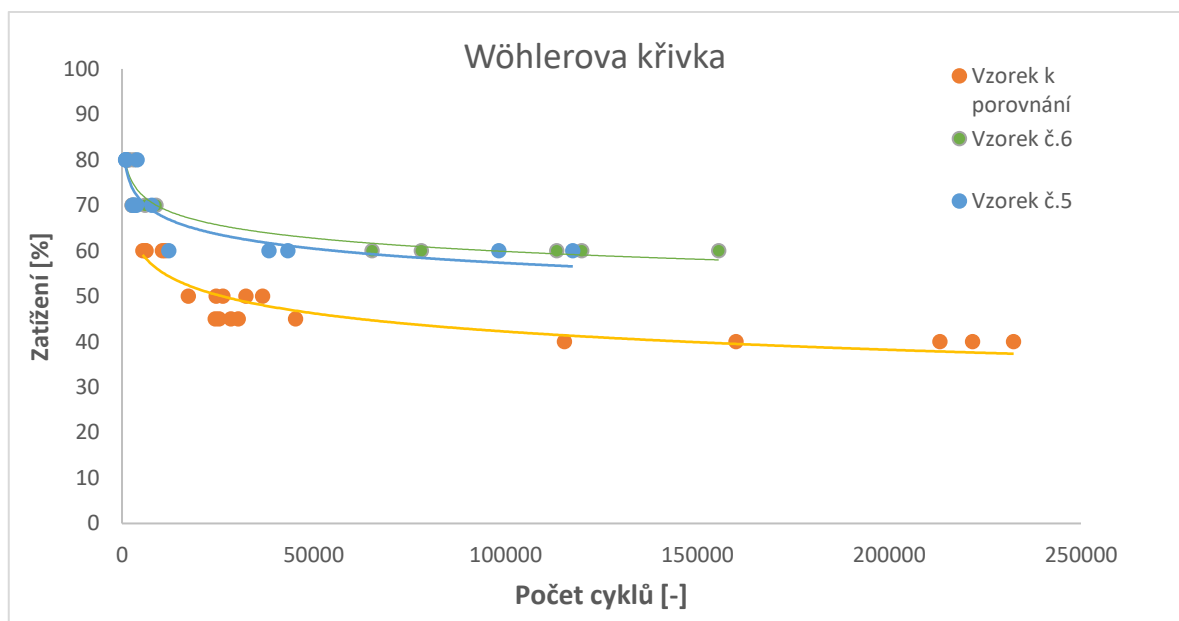
	Zatěžující síla při 60 %	Průměrný počet cyklů při 60 %
Vzorek k porovnání	12 720 N	7 901
Vzorek č.5	1 506 N	61900
Vzorek č.6	1 266 N	69586





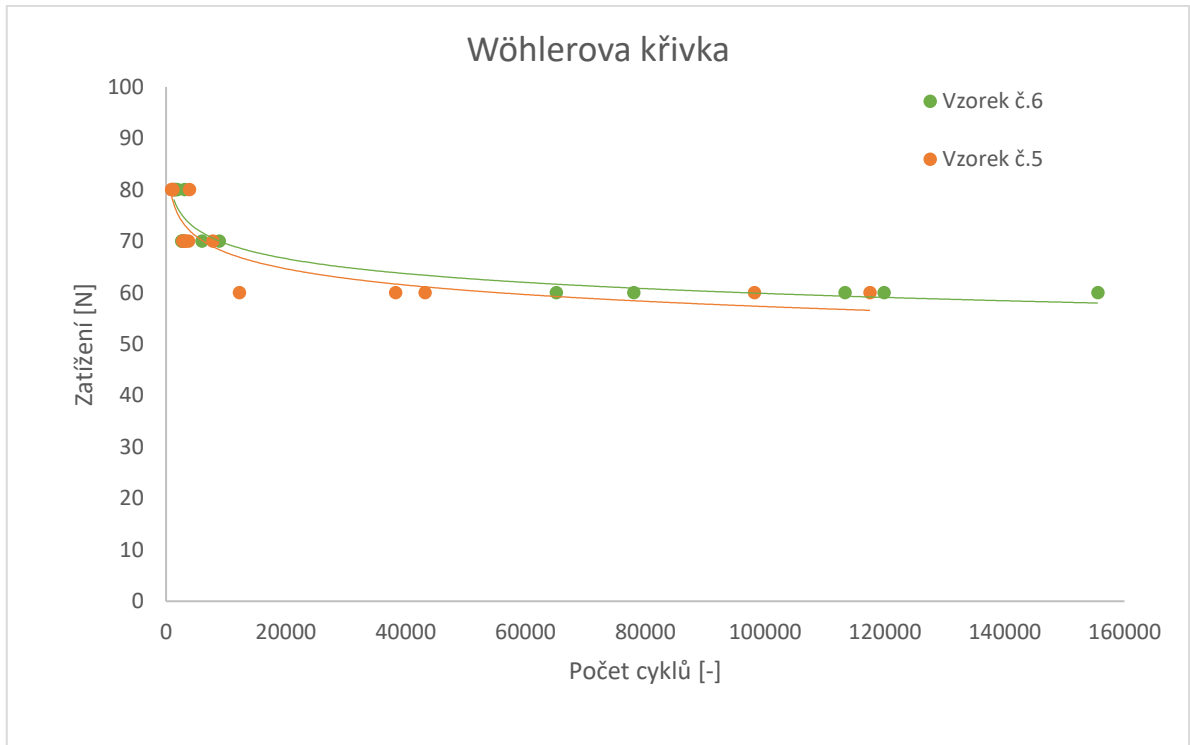
Obr. 57 Porovnání jednotlivých vzorků při zatížení 60 %  $F_{max}$

Jak lze vidět z grafu na obrázku (Obr. 56) hodnoty vzorků k porovnání se diametrálně liší od vzorků č.5 a vzorků č.6. Nejspíše je to dáno hodnotou zatěžující síly, která byla oproti ostatním vzorkům téměř desetinásobná.



Obr. 58 Srovnání Wöhlerových křivek v závislosti zatížení na počtech cyklů

Na Wöhlerova křivce lze vidět porovnání jednotlivých křivek životnosti a jejich závislosti procentuálního zatížení z maximální síly k přetržení a počtu cyklů u zkušebních vzorků jednotlivých skupin.



Obr. 59 Srovnání Wöhlerových křivek v závislosti zatížení na počtu cyklů u vzorků č.5 a č.6

Na Wöhlerova křivce životnosti vzorků č.5 a vzorků č.6 lze vidět, že tyto vzorky jsou si v závislosti procentuálního zatížení a počtu cyklů dosti podobné, a tak budou mít i dosti podobné parametry u použití v praxi.

### 6.3.1 Shrnutí dynamických vlastností v tahu

Z provedených zkoušek a naměřených dat je zřejmé, že i zde má vrstvení odštířků překládáním jasný vliv na životnost daného typu překládání. Vzorky č.5 se vzorky č.6 vykazovaly dosti podobné parametry při cyklickém zatěžování v jednotlivých hladinách. Vzorek, který je určen k porovnání prokazoval však při stejné hladině všech tří vzorků (60 %) zcela jiné hodnoty. Bylo to způsobeno s největší pravděpodobností hodnotou zatěžující síly, která byla u tohoto vzorku 10x vyšší, tudíž tento vzorek vydržel ve stejné hladině podstatně nižší počty cyklů než u vzorků ostatních.

## ZÁVĚR

Tato diplomová práce pojednává o problematice únavového chování u konstrukčních kompozitů a faktorech, které toto chování ovlivňuje. Jako zkušební tělesa na porovnání jednotlivých vlastností materiálu bylo vytvořeno šest sad zkušebních vzorků. Faktorem, který tyto vlastnosti ovlivňuje bylo zadáno vrstvení jednotlivých odstrižků z prepregu způsobem překládání jednotlivých vrstev. Porovnáním jednotlivých vlastností a naměřených hodnot u zkušebních vzorků bylo zjištěno jaký mají vliv dané modifikace na statické a dynamické využití v praxi.

Jako první byla provedena statická zkouška třibodového ohybu u vzorků č.1, č.2, č.3 a č.4. Z naměřených hodnot těchto vzorků bylo zjištěno, že vrstvení formou překládání má značný vliv na výsledné hodnoty jako je modul pružnosti, maximální síla či mez pevnosti v ohybu jednotlivých vzorků. Vzorek č.1, který byl vrstven bez překládání odstrižků rovnoměrně ve směru vlákna, měl prokazatelně nejvyšší hodnoty. Modul pružnosti v ohybu u vzorku č.1 byl naměřen 37 840 MPa, maximální síla 1 666 N a mez pevnosti v ohybu pak 802 MPa. U modulu pružnosti byl rozdíl proti ostatním vzorkům trojnásobný, u maximální síly a meze pevnosti byl pak tento rozdíl pětinasobný. Mezi vzorky č.2, č.3 a č.4 pak nebyli až tak rozdílné, avšak vzorky č.3 vykazovaly dle dané modifikace překládání vyšší hodnoty než u dalších dvou zkušebních sad vzorků. Na tyto hodnoty měl pravděpodobně i vliv umístění překladů, kde byly vrstvy odstrižků překládány přesně uprostřed zkušebních vzorků. U vzorků k porovnání, vzorků č.5 a č.6 pak byly taktéž provedené statické zkoušky, avšak v tahu. I zde dosahoval vzorek k porovnání, který byl vrstven bez překládání odstrižků, daleko vyšších hodnot a lepších vlastností než vzorky č.5 a č.6. Modul pružnosti v tahu byl naměřen 20 820 MPa, což byl více jak trojnásobný rozdíl, maximální síla pro porušení zkušebních vzorků byla 21 669 N, kde tato hodnota byla téměř desetinásobná a mez pevnosti v tahu pak měla hodnotu 684 MPa, kdy tato hodnota byla oproti vzorkům č.5 a č.6 taktéž téměř desetinásobná. Mezi vzorkem č.5 a č.6 pak byl rozdíl u jednotlivých hodnot minimální jen u maximální síly vzorek č.5 o 400 N vyšší než u vzorku č.6. Dynamické namáhání a únavové vlastnosti v tahu se pak srovnávaly u vzorku č.5 a vzorku č.6 se vzorkem určeným k porovnání. Zkušební vzorky se cyklovaly na 80 %, 70 % a 60 % z maximální síly potřebné k porušení vzorku zjištěné ze statických zkoušek. Pro vzorky č.5 byly hladiny nastaveny z maximální síly 2 510 N, u vzorků č. 6 byly nastaveny z hodnoty 2 110 N a pro vzorky určené k porovnání pak z maximální síly 21 200 N. Vzorky určené k porovnání byly měřeny v hladinách 60 %, 50 %, 45% a 40%. Z těchto důvodů se daly všechny vzorky srovnat jen

v hladině 60 % z maximální síly. Při této hladině vykazovaly výsledky dosti rozdílné hodnoty mezi vzorkem k porovnání a vzorky č.5 a č.6. Počet cyklů u vzorků č. 5 byl při 60 % zatížením v průměru 61 900, u vzorků č. 6 byla průměrná hodnota cyklů 69586 a u vzorků pro porovnání byla průměrná hodnota cyklů jen 7 901. Důvodem tohoto rozdíle je s největší pravděpodobností rozdílná síla zatěžování, protože u vzorků k porovnání byla síla zatěžování 12 720 N, kdežto u vzorků č.5 byla síla 1 506 N a u vzorků č.6 jen 1 266 N. I přes tyto výsledky lze usoudit, že vrstvení odstřížků překládáním má vliv i na dynamické vlastnosti daných modifikací vrstvení. Pro vzorky č.1, č.2, č.3 a č.4 pak nebylo možno měřit dynamické namáhání v ohybu z důvodů technických problémů zkušebního stroje a krátké délce již nařezaných zkušebních těles pak nebylo možné měřit ani cyklické zatěžování v tahu.

Při aplikaci daných poznatků nutno brát zřetel na typ vrstvení překladů a snažit se o co nejmenší počet překládaných vrstev. U některých typů konstrukčních řešení, jako jsou listové pružiny z kompozitního materiálu, kde je výhodné a důležité skládat co nejvíce vrstev souměrně na sebe, aby zde nevznikaly trhliny na rozhraní těchto vrstev a tato pružina tak vydržela co největší možné zatížení v praxi

**SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY**

- [1] EHRENSTEIN, Gottfried. *Polymerní kompozitní materiály*. V ČR 1. vyd. Praha: Scientia, 2009, 351 s. ISBN 9788086960296
- [2] KRATOCHVÍL, Bohumil, Václav ŠVORČÍK a Dalibor VOJTĚCH. *Úvod do studia materiálů*. Vyd. 1. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická, 2005, 190 s. ISBN 80-708-0568-4.
- [3] LIPTÁKOVÁ, Tatiana, Pavol A LEXY, Ernest GONDÁR a Viera KHUNOVÁ. *Polymérne konštrukčné materiály* [online]. EDIS, 2012 [cit. 2016-02-19]. ISBN 978-80-554-0505-6. Dostupné z: <http://kmi2.uniza.sk/wpcontent/uploads/2009/10/POLYMERY-Po-RECENZII.pdf>
- [4] MORAVČÍK, Roman, Marián HAZLINGER, Mária HUDÁKOVÁ, Maroš MARTINKOVIČ a Roman ČIČKA. *Náuka o materiáloch I*. [online]. Trnava: AlumniPress, 2010 [cit. 2016-02-19]. ISBN 978-80-8096-123-7. Dostupné z: <https://www.scribd.com/doc/46201870/15/ZLO%C5%BDENE-KOMPOZITNEMATERIALY#page=221>
- [5] CHUNG, Deborah. *Composite Materials: Science and Applications*. 2. vyd. London: Springer, 2010, 349 s. : grafy, fot. ISBN 9781848828308.
- [6] CAMPBELL, F.C. *Structural composite materials* [online]. Materials Park, Ohio: ASM International, 2010 [cit. 2016-02-19]. ISBN 978-161-3441-244. Dostupné z: [https://app.knovel.com/web/toc.v/cid:kpSCM00001/viewerType:toc/root\\_slug:structural-composite-materials](https://app.knovel.com/web/toc.v/cid:kpSCM00001/viewerType:toc/root_slug:structural-composite-materials)
- [7] STRONG, Brent. *History of composites - opportunities and necessities* [online]. Birmingham, 2002 [cit. 2016-02-20]. Dostupné z: <https://www.yumpu.com/en/document/view/7139494/history-of-composite-materialsoportunities-dr-brent-strong>

- [8] JAMES CYRIAC, Ajith. *Metal matrix composites: History, status, factors and future*. India, 2005. Master's theses. Cochin University of Science and Technology. Vedoucí práce Dr. Jay C. Hanan.
- [9] JANOVEC, Jiří, Jiří *CEJP a Josef STEIDL*. Perspektivní materiály. Vyd. 3., přeprac. V Praze: České vysoké učení technické, 2008, 143 s. ISBN 978-80-01-04167-3.
- [10] KAREL MACEK, Petr. *Strojírenské materiály*. Vyd. 1. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2003. ISBN 978-800-1027-981.
- [11] CHAWLA, Krishan. *Composite materials: science and engineering*. 2nd ed. New York: Springer, 1998. Materials research and engineering (Unnumbered). ISBN 03-879-8409-7.
- [12] BĚHÁLEK, Luboš. *Polymery* [online]. Svitavy: Code Creator, 2015 [cit. 2017-11-20]. ISBN 978-80-88058-68-7. Dostupné z: <https://publi.cz/books/180/Cover.html>
- [13] *Polymery*. In: Publi [online]. b.r. [cit. 2017-10-25]. Dostupné z: <https://publi.cz/books/180/Cover.html>
- [14] PEEK biomaterials in trauma, orthopedic, and spinal implants. *Biomaterials*. 2007, 28, 4845-4869.
- [15] JANČÁŘ, Josef. *Úvod do materiálového inženýrství polymerních kompozitů*. Vyd. 1. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2003. ISBN 80-214-2443-5.
- [16] VOJTĚCH, Dalibor. *Kovové materiály*. Vyd. 1. Praha: Vydavatelství VŠCHT, 2006. ISBN 80-708-0600-1.
- [17] 6. KOMPOZITNÍ MATERIÁLY. In: Ústav materiálového inženýrství [online]. Praha: ČVUT, 2014 [cit. 2017-11-16]. Dostupné z: [http://umi.fs.cvut.cz/wp-content/uploads/2014/08/6\\_kompozitni-materialy.pdf](http://umi.fs.cvut.cz/wp-content/uploads/2014/08/6_kompozitni-materialy.pdf)
- [18] VRBKA, Jan. *Mechanika kompozitů*. In: Vysoké učení technické v Brně [online]. Brno, 2008 [cit. 2017-11-16]. Dostupné z: [https://www.vutbr.cz/www\\_base/priloha.php?dpid=83340](https://www.vutbr.cz/www_base/priloha.php?dpid=83340)

- [19] *Mechanické vlastnosti polymerů* [online]. [cit. 2006-01-10]. Dostupný z WWW:<<http://www.beltplast.cz/>>.
- [20] JARUŠEK, Jaroslav. *Metody zkoumání polymerů*. VŠCHT Pardubice, 1984
- [21] MĚŠŤÁNEK, Petr. *Únavové poškození kompozitních materiálů*. [cit. 2017-04-18]. Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta aplikovaných věd, 2014. Vedoucí diplomové práce Prof. Ing. Vladislav Laš, CSc.
- [22] VASSILOPOULOS, Anastasios P. *Fatigue life prediction of composites and com-posite structures: edited by Anastasios P. Vassilopoulos*. Oxford: Woodhead Pub-lishing, 2010. Woodhead Publishing in materials. ISBN 1439827893.
- [23] ASKELAND, Donald R, Pradeep P FULAY a Wendelin J WRIGHT. *The science and engineering of materials*. 6th ed. Stamford, CT: Cengage Learning, c2011, xxi, 921 p. ISBN 04-956-6802-8.
- [24] MLEZIVA, Josef. *Polymery - výroba, struktura, vlastnosti a použití*. 1. vyd. Praha: Sobotáles, 1993, 525 s. ISBN 80-901-5704-1.
- [25] HAGEN, Vladislav. *Únava a stárnutí materiálu*. Brno: Vysoké učení tech-nické v Brně, 1981.
- [26] DA COSTA, Helson M., Valéria D. RAMOS a Márcia G. DE OLIVEIRA. Degradation of polypropylene (PP) during multiple extrusions: Thermal analy-sis, mechanical properties and analysis of variance. *Polymer Testing*. 2007, vol. 26, issue 5, s. 676-684. DOI: 10.1016/j.polymertesting.2007.04.003. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0142941807000591>
- [27] *Laminační pryskyřice L285*. havel-composites.com [online]. [cit.20.04.2017].
- [28] Prepreg technologie pro výrobu uhlíkové a skelné tkaniny | FORM s.r.o.. FORM s.r.o. [online]. Copyright © 2018, FORM s.r.o. [cit. 26.04.2018]. Dostupné z: <http://www.form-composite.com/prepreg>
- [29] Havel Composites. Havel Composites [online]. Dostupné z: <http://www.havel-composites.com/clanky/4-Technologie/74-Vseobecny-a-zakladni-popis-materialu-pouzivanych-pri-vyrobe-kompozitu.html>
- [30] *Materials Science and Engineering introduction Chapter 15 Composites 7th ed.pdf: Chapter 15 Composites* [online]. 31.12.2015 [cit. 2018-05-11].

- [31] ŠUBA, Oldřich. Mechanika polymerů a kompozitů. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, Academia centrum, 2011. ISBN 978-80-7454-015-8.
- [32] Morris CJ. Composite integrated rear suspension. *Compos Struct* 1986;5 (3):233–42.
- [33] Yu WJ, Kim HC. Double tapered FRP beam for automotive suspension leaf spring. *Compos Struct* 1988;9(4):279–300.
- [34] Chen Qian, Wenku Shi, Zhiyong Chen, Shixiang Yang, Fatigue reliability design of composite leaf springs based on ply scheme optimization, State Key Laboratory of Automotive Simulation and Control, Jilin University, Changchun 130022, China
- [35] Žaludek Milan, Rusnák Vladimír, Rusnáková Soňa. Účinky chemického prostředí a klimatického působení na vlastnosti kompozitu, Ústav výrobního inženýrství, Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
- [36] Harry Purington, Effect of resin properties on the delamination of tapered continuous unidirectional carbon fibre composites under longitudinal tension, Department of Aerospace Engineering, University of Bristol
- [37] Senthilkumar Mouleeswaran, Design, Manufacturing and Testing of Polymer Composite Multi-Leaf Spring for Light Passenger Automobiles, Department of Mechanical Engineering, PSG College of Technology, Coimbatore/ India
- [38] KRÁL, M. Únava vlákný vyztužených kompozitů s polymerní matricí(online) Praha, 2014 [cit.2016-04-28]Prezentace. Výzkumný a zkušební letecký ústav. Dostupné z: [http://www.csm-kompozity.wz.cz/Prezentace\\_UTAM.pdf](http://www.csm-kompozity.wz.cz/Prezentace_UTAM.pdf)
- [39] Růžička, M. Hanke, M. a Rost, M.: Dynamická pevnost a životnost. Praha:Nakladatelství ČVUT,1987,212s.



**SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK**

PP	Polypropylen.
g	gram
$cm^3$	centimetr krychlový
MPa	Megapascal
N	Newton
°C	stupeň Celsia
$t_m$	teplota tání
$t_g$	teplota skelného přechodu
SiC	karbid křemíku
TiB <sub>2</sub>	karbid titanu
Mg	hořčík
Al	hliník
Zn	zinek
$\epsilon$	poměrné délkové prodloužení
$\sigma$	napětí
GPa	gigapascal
mm	milimetr
$\mu m$	mikrometr
Kc	Lomová houževnatost
G	Hnací síla trhliny
f	Frekvence
Hz	Hertz

---

$\sigma_a$	amplituda napětí
$\sigma_h$	horní napětí
$\sigma_d$	dolní napětí
$\sigma_m$	střední napětí
$R_e$	mez kluzu
K	stupeň Kelvina
UV	ultrafialové záření
min	minuta
cm	centimetr
L	délka
b	šířka
a	tloušťka
kW	kilowatt
kg	kilogram
kN	kilonewton
$F_{max}$	maximální síla
$\sigma_{Fmax}$	mez pevnosti v ohybu
$\varepsilon_{Fmax}$	poměrná deformace na mezi pevnosti
$y_{Fmax}$	průhyb při mezi pevnosti
$W_{Fmax}$	práce potřebná na dosažení maximální síly
Cu	Měď

## SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 1</i> Skladba kompozitního materiálu[8]. .....	13
<i>Obr. 2</i> Kompozitní materiál[8]. .....	13
<i>Obr. 3</i> Rozdělení kompozitních materiálů[9].....	15
<i>Obr. 4</i> Tekutá epoxidová pryskyřice[11] .....	17
<i>Obr. 5</i> Varianty výztuže u výroby prepregů [5] .....	19
<i>Obr. 6</i> Rozdělení materiálů výztuží [7] .....	22
<i>Obr. 7</i> Graf závislosti napětí na prodloužení různých vláknových kompozitů [1].....	23
<i>Obr. 8</i> Skelná vlákna [9].....	24
<i>Obr. 9</i> Technologie výroby skelného vlákna [9].....	25
<i>Obr. 10</i> Uhlíková vlákna [9].....	26
<i>Obr. 11</i> Pracovní linka pro výrobu vláken PAN [9].....	26
<i>Obr. 12</i> Kevlarová vlákna [9].....	27
<i>Obr. 13</i> Bórové vlákno [16].....	27
<i>Obr. 14</i> Rozdíl u poškození homogenních a kompozitních materiálů[1].....	31
<i>Obr. 15</i> Rozvoj typů poškození během zkoušky u kompozitních těles .....	32
<i>Obr. 16</i> Srovnání únavových vlastností u kompozitů[1] .....	33
<i>Obr. 17</i> Typy a úrovně cyklického zatěžování[1].....	34
<i>Obr. 18</i> Možné modifikace u zatěžovací křivky[1].....	35
<i>Obr. 19</i> Diagram únavové životnosti zatěžovaný ve směru vláken[22].....	36
<i>Obr. 20</i> Wöhlerova křivka pro srovnání polymer a ocel .....	37
<i>Obr. 21</i> Charakteristika cyklického zatěžování [1] .....	37
<i>Obr. 22</i> Charakteristické oblasti na Wöhlerově křivce[1].....	38
<i>Obr. 23</i> Struktura kompozitní listové pružiny [34] .....	40
<i>Obr. 24</i> Oblast trojúhelníku mezi kratší a delší vrstvou [33] .....	41
<i>Obr. 25</i> Schéma lisování mezi vyhřívanými deskami.....	45
<i>Obr. 26</i> Ukázka nastříhaných pásů a jednotlivých odstřížků před lisováním .....	46
<i>Obr. 27</i> Ukázka jedné z modifikací kladení vrstev na sebe .....	46
<i>Obr. 28</i> Příklad lisování mezi vyhřívanými deskami .....	47
<i>Obr. 29</i> Schéma vrstvení u vzorku č.1 .....	48
<i>Obr. 30</i> Schéma vrstvení u vzorku č.2 .....	49
<i>Obr. 31</i> Schéma vrstvení u vzorku č.3 .....	49
<i>Obr. 32</i> Schéma vrstvení u vzorku č.4 .....	50

<i>Obr. 33 Schéma vrstvení u vzorku č.5 .....</i>	<i>50</i>
<i>Obr. 34 Schéma vrstvení u vzorku č.6 .....</i>	<i>51</i>
<i>Obr. 35 Ukázka nařezaných zkušebních těles .....</i>	<i>52</i>
<i>Obr. 36 Zkušební přístroj ZWICK 1456 .....</i>	<i>53</i>
<i>Obr. 37 Ukázka statické zkoušky před a po zatížení .....</i>	<i>54</i>
<i>Obr. 38 Závislost napětí na poměrné deformaci pro vzorky č.1 .....</i>	<i>55</i>
<i>Obr. 39 Závislost napětí na poměrné deformaci pro vzorky č.2 .....</i>	<i>56</i>
<i>Obr. 40 Závislost napětí na poměrné deformaci pro vzorky č.3 .....</i>	<i>57</i>
<i>Obr. 41 Závislost napětí na poměrné deformaci pro vzorky č.4 .....</i>	<i>58</i>
<i>Obr. 42 Grafické znázornění hodnot modulů pružnosti v ohybu .....</i>	<i>59</i>
<i>Obr. 43 Grafické znázornění hodnot maximálních sil .....</i>	<i>60</i>
<i>Obr. 44 Grafické znázornění hodnot pro mez pevnosti v ohybu .....</i>	<i>60</i>
<i>Obr. 45 Zkušební stroj pro statické i dynamické zatěžování Vibrophore 1000 .....</i>	<i>62</i>
<i>Obr. 46 Závislost napětí na poměrné deformaci pro vzorky č.5 .....</i>	<i>63</i>
<i>Obr. 47 Závislost napětí na poměrné deformaci pro vzorky č.6 .....</i>	<i>64</i>
<i>Obr. 48 Závislost napětí na poměrné deformaci pro vzorky k porovnání .....</i>	<i>65</i>
<i>Obr. 49 Grafické znázornění hodnot modulu pružnosti v tahu .....</i>	<i>66</i>
<i>Obr. 50 Grafické znázornění hodnot maximálních sil .....</i>	<i>67</i>
<i>Obr. 51 Grafické znázornění hodnot mezí pevností v tahu .....</i>	<i>67</i>
<i>Obr. 52 Jednotlivé vzorky po statických zkouškách .....</i>	<i>68</i>
<i>Obr. 53 Průběh zatěžování je sinusový .....</i>	<i>69</i>
<i>Obr. 54 Wöhlerova křivka pro vzorky č.5 .....</i>	<i>70</i>
<i>Obr. 55 Wöhlerova křivka pro vzorky č.6 .....</i>	<i>71</i>
<i>Obr. 56 Wöhlerova křivka pro vzorky k porovnání .....</i>	<i>72</i>
<i>Obr. 57 Porovnání jednotlivých vzorků při zatížení 60 % <math>F_{max}</math> .....</i>	<i>73</i>
<i>Obr. 58 Srovnání Wöhlerových křivek v závislosti zatížení na počtech cyklů .....</i>	<i>73</i>
<i>Obr. 59 Srovnání Wöhlerových křivek v závislosti zatížení na počtu cyklů u vzorků č.5 a č.6 .....</i>	<i>74</i>

**SEZNAM TABULEK**

<i>Tab. 1 Srovnání pevnostních charakteristik kovů a polymerních kompozitních materiálů .....</i>	<i>12</i>
<i>Tab. 2 Porovnání teplot zpracování a skelného přechodu u různých pryskyřic .....</i>	<i>16</i>
<i>Tab. 3 Mechanické vlastnosti používaných vlastností [4] .....</i>	<i>23</i>
<i>Tab. 4 Rozměry vzorku 1.modifikace .....</i>	<i>48</i>
<i>Tab. 5 Rozměry vzorku 2.modifikace .....</i>	<i>48</i>
<i>Tab. 6 Rozměry vzorku 3.modifikace .....</i>	<i>49</i>
<i>Tab. 7 Rozměry vzorku 4.modifikace .....</i>	<i>49</i>
<i>Tab. 8 Rozměry vzorku 5.modifikace .....</i>	<i>50</i>
<i>Tab. 9 Rozměry vzorku 6.modifikace .....</i>	<i>50</i>
<i>Tab. 10 Naměřená a vyhodnocená data pro vzorky č.1 .....</i>	<i>55</i>
<i>Tab. 11 Naměřená a vyhodnocená data pro vzorky č.2 .....</i>	<i>56</i>
<i>Tab. 12 Naměřená a vyhodnocená data pro vzorky č.3 .....</i>	<i>57</i>
<i>Tab. 13 Naměřená a vyhodnocená data pro vzorky č.4 .....</i>	<i>58</i>
<i>Tab. 14 Výsledné hodnoty pro jednotlivé vzorky u statického tříbodového ohybu .....</i>	<i>59</i>
<i>Tab. 15 Naměřená a vyhodnocená data pro vzorky č.5 .....</i>	<i>62</i>
<i>Tab. 16 Naměřená a vyhodnocená data pro vzorky č.6 .....</i>	<i>63</i>
<i>Tab. 17 Naměřena a vyhodnocená data pro vzorky určených k porovnání mechanických a dynamických dat .....</i>	<i>65</i>
<i>Tab. 18 Výsledné hodnoty pro jednotlivé vzorky u zkoušky statického tahu .....</i>	<i>66</i>
<i>Tab. 19 Parametry pro zatěžování vzorků č.5 .....</i>	<i>69</i>
<i>Tab. 20 Parametry pro zatěžování vzorků č.6 .....</i>	<i>69</i>
<i>Tab. 21 Tabulka počtu cyklů při daném zatížení pro vzorky č.5 .....</i>	<i>70</i>
<i>Tab. 22 Tabulka počtu cyklů při daném zatížení pro vzorky č.6 .....</i>	<i>71</i>
<i>Tab. 23 Tabulka počtů cyklů při daném zatížení u vzorků k porovnání .....</i>	<i>71</i>
<i>Tab. 24 Hodnoty zatěžujících sil a počtu cyklů u jednotlivých vzorků .....</i>	<i>72</i>

## SEZNAM PŘÍLOH

Příloha PI: Materiálový list UD Deltapregu VV340

# PŘÍLOHA P I: MATERIÁLOVÝ LIST UB DELTAPREGU VV340U

Delta-Preg S.p.a. Uniminorale  
località Benifica del Tronto  
64016 - Sant'Egidio alla Vibrata  
(TE) Italia

Telefono: [39] 0861815106  
fax: [39] 0861815681  
e-mail: info@deltapreg.it

## SCHEDA TECNICA DI PRODOTTO/PRODUCT TECHNICAL DATA SHEET

Codice Articolo/ Material code: A-PR009106

Rev. 1.02 - 09/10/2014

### VV430U-DT806W-33 (H 124 cm)

#### Caratteristiche del sistema resinoso/ Features of the resin matrix: (\*)

Natura del formulato/ Chemical nature	Epossidico termoidurente/ Thermosetting epoxy
Temperatura di cura/ Cure temperature	65 + 140°C
Gel time	50 + 60 min @ 80°C 15 + 19 min @ 100°C
Tg (Ciclo di cura)/ Tg (Cure cycle)	Ref. to DT806 technical data sheet (1)
Viscosità/ Viscosity	Bassa/ Low (2)
Trasparenza/ Transparency	Molto buona/ Very good
Stabilità all'ingiallimento/ UV stability	N.A. (vedi Trasparenza)/ N.A. (see Transparency)
Indicato per applicazioni dove siano richiesti/ Recommended for those applications requiring:	-Indurimento a bassa temperatura/ Low temperature cure -Stampaggio rapido in pressa/ Fast press moulding -Elevati requisiti estetici/ Good surface quality

(1) Misurato con DSC alla velocità di scansione di 10°C/min / Measured by DSC @ 10°C/min

(2) Viscosità complessiva ridotta a 60°C valore di 100 Poise (frequenza 10 rad/s) / Complex viscosity < 100 Poise @ 60°C (frequency 10 rad/s)

#### Caratteristiche del tessuto impregnato/ Features of the impregnated fabric:

Tipo di filato (Ordito, Trama)/ yarn type (Warp, Weft)	EC9 5x136 tex, EC9 68 tex
Stile di tessitura/ Weaving style	Tela/ Plain
Larghezza standard/ Standard width	1340 ± 5 mm (esclusa cimosa/ without selvedge)
Lunghezza standard/ Standard length	33 ± 3 m
Ordito (filò/ cm)/ Warp (ends/ cm)	5,50 ± 0,20
Trama (filò/ cm)/ Weft (picks/ cm)	6,30 ± 0,30
Peso areale fibra secca/ FWH	425 ± 20 g/m <sup>2</sup>
Contenuto di resina/ Resin content	33 ± 3 % in peso/ by weight
Contenuto di volatili/ Volatile content	< 1,0 % in peso/ by weight (3)
Spessore lamina/ Laminate thickness	0,340 mm (4)
Conservazione/ Shelf life	3 settimane @ 21°C/ 3 weeks @ 21°C 12 mesi @ -18°C/ 12 months @ -18°C

(3) Foratura in peso dopo 15 min in forno ventilato a 160°C/ Puncture loss after 15 min in oven @ 160°C

(4) Valore indicativo, può variare in funzione dell'eventuale fuoriuscita di resina dal laminato o della perdita di volatili/ This value depends on eventual resin bleed out and/or volatile priority in the cured laminate

(\*) Per maggiori dettagli riferirsi alla corrispondente scheda TDS/ For additional information please refer to the appropriate resin TDS

Documento soggetto a eventuali aggiornamenti senza obbligo di comunicazione preventiva  
This document may be subject to change without prior notice