

Vliv typu a materiálu výztuže na únavovou životnost kompozitů

Bc. Michal Brostík

Diplomová práce
2018



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická
Ústav výrobního inženýrství
akademický rok: 2017/2018

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE (PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: Bc. Michal Brostík
Osobní číslo: T16590
Studijní program: N3909 Procesní inženýrství
Studijní obor: Výrobní inženýrství
Forma studia: prezenční

Téma práce: Vliv typu a materiálu výztuže na únavovou životnost kompozitů

Zásady pro vypracování:

1. vypracování literární rešerše k dané problematice
2. výroba a zhotovení zkušebních těles
3. provedení experimentálních únavových zkoušek
4. zpracování a vyhodnocení výsledků

Rozsah diplomové práce:

Rozsah příloh:

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

Seznam odborné literatury:

Dle doporučení vedoucího diplomové práce

Vedoucí diplomové práce:

Ing. Milan Žaludek, Ph.D.

Ústav výrobního inženýrství

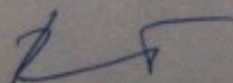
Datum zadání diplomové práce:

2. ledna 2018

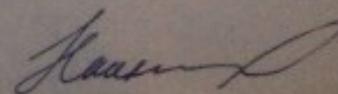
Termín odevzdání diplomové práce:

18. května 2018

Ve Zlíně dne 5. února 2018



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



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

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že

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

Ve Zlíně 17.5.2018

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

ABSTRAKT

Cílem diplomové práce je studium únavového chování kompozitních materiálů na bázi prepregů, jejich vzájemné porovnání základních mechanických vlastností a porovnání těchto vlastností při změně klimatického prostředí.

Teoretická část se zabývá problematikou kompozitních materiálů, používaných materiálů při výrobě a výrobními technologiemi. Další část definuje únavové chování kompozitních materiálů, charakterizuje parametry únavových zkoušek a v neposlední řadě se zabývá vlivem klimatického prostředí na chování kompozitních materiálů. Praktická část je zaměřena na popis a výrobní proces zkušebních těles pro statické a únavové zkoušky. V neposlední řadě obsahuje také vyhodnocení výsledků získaných měřeními základních mechanických a únavových vlastností zkušebních těles pomocí statické a cyklické zkoušky tříbodovým ohybem.

Klíčová slova: prepreg, únavové chování, klimatické zatížení, cyklické zkoušky, UD Deltapreg 34% VV430U, UD Carbon IMP GV420U, Hybridní deska

ABSTRACT

The aim of the diploma thesis is to study the fatigue behavior of composite materials on the basis of prepregs, their mutual comparison of basic mechanical properties and comparison of these properties in the change of climatic environment.

The theoretical part deals with the issue of composite materials, materials used in production and production technologies. Another part defines the fatigue behavior of composite materials, characterizes parameters of fatigue tests and last but not least deals with influence of climatic environment on the behavior of composite materials. Practical part is focused description and production process of test bodies for static and fatigue tests. Last but not least, it also includes the evaluation of the results obtained by measuring the basic mechanical and fatigue properties of the test bodies by means of a three-point static and cyclic test.

Keywords: prepreg, fatigue behavior, climatic load, cyclic tests, UD Deltapreg 34% VV430U, UD Carbon IMP GV420U, Hybrid plate

Poděkování:

Chtěl bych poděkovat vedoucímu diplomové práce Ing. Milanu Žaludkovi, Ph.D., za odborné vedení, jeho ochotně poskytnuté rady a pozornost, kterou mi věnoval po celou dobu vypracování diplomové práce. Velké díky patří také Ing. Ladislavu Fojtlovi, Ph.D., za velkou pomoc při realizaci zkoušek. Chtěl bych také poděkovat rodičům a kamarádům za veškerou podporu při studiu na vysoké škole.

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

OBSAH

ÚVOD	11
I. TEORETICKÁ ČÁST	12
1 KOMPOZITNÍ MATERIÁLY	13
1.1 ZÁKLADNÍ ÚDAJE O KOMPOZITECH.....	13
1.2 ROZDĚLENÍ KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ	14
1.2.1 Rozdělení podle geometrie vláken:.....	14
1.2.2 Rozdělení podle výztuže:	16
1.3 DRUHY VÝZTUŽÍ.....	17
1.3.1 Vláknové výztuže.....	17
1.3.2 Podoba výztuží	21
1.3.3 Porovnání vláken.....	22
1.3.4 Částicové výztuže.....	25
1.4 MATRICE	25
1.4.1 Úloha matrice a její druhy	25
1.5 REAKTIVNÍ PRYSKYŘICE.....	27
1.5.1 Nenasycené polyesterové pryskyřice	27
1.5.2 Vinylesterové pryskyřice (VE-R)	28
1.5.3 Epoxidové pryskyřice (EP-R)	28
1.5.4 Fenolické pryskyřice (PF-R).....	29
1.5.5 Porovnání základních mechanických vlastností VÝZTUŽE a MATRICE.....	30
1.6 MECHANICKÉ VLASTNOSTI VLÁKNOVÝCH KOMPOZITŮ	31
1.6.1 Anizotropie laminy.....	32
2 ÚNAVOVÉ NAMÁHÁNÍ KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ	34
2.1 POŠKOZENÍ KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ	34
2.2 ÚNAVOVÉ ZKOUŠKY KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ	38
2.2.1 Průběhy napětí a frekvence	38
2.3 WÖHLEROVA KŘIVKA.....	40
2.3.1 Popis cyklu Wöhlerovi křivky	41
2.4 NORMALIZOVANÉ METODY ÚNAVOVÝCH ZKOUŠEK	42
3 VLIV KLIMATICKÉHO PROSTŘEDÍ NA ÚNAVOVÉ VLASTNOSTI KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ	44
3.1 VLIV PROSTŘEDÍ NA VLÁKNA A MATRICI.....	44
3.1.1 Vliv prostředí na skelné vlákno.....	44
3.1.2 Vliv prostředí na pevnost uhlíkového vlákna.....	45
3.1.3 Pevnost a tuhost matrice v závislosti na teplotě.....	46
3.2 VLIV VLHKOSTI A TEPLoty NA KOMPOZITNÍ MATERIÁL	47
3.2.1 Vliv vlhkosti na odolnost proti tahu	47
3.2.2 Vliv teploty na kompozitní materiál	48
3.2.3 Vliv teploty na mechanické vlastnosti kompozitu	48
4 KOMPOZITNÍ MATERIÁLY VYZTUŽENÉ UHLÍKOVÝMI VLÁKNY	50

4.1	ÚNAVOVÉ VLASTNOSTI KOMPOZITŮ S UHLÍKOVÝMI VLÁKNY.....	51
5	TECHNOLOGIE PREPREG	52
5.1.1	UD Prepregy.....	54
5.2	POUŽITÍ PREPREGŮ	54
5.2.1	Porovnání základních mechanických vlastností vláken použitých při výrobě prepregů:	56
II	PRAKTICKÁ ČÁST	57
6	VÝROBA ZKUŠEBNÍCH TĚLES	58
6.1	POSTUP VÝROBY	58
6.1.1	Podmínky vytvrzování UD Deltapreg VV430U 34%.....	59
6.1.2	Podmínky vytvrzování UD Carbon IMP GV 420U	59
7	PŘÍPRAVA ZKUŠEBNÍCH TĚLES.....	61
7.1	POUŽITÉ MATERIÁLY PRO ZKUŠEBNÍ TĚLESA.....	61
7.1.1	Materiál UD Deltapreg VV430U-DT806R 34%	61
7.1.2	Materiál UD Carbon IMP GV420U-DT806W-37%.....	61
7.1.3	Matrice	62
7.2	ZKUŠEBNÍ TĚLESA POSUZOVÁNA NA VLIV STATICKÉHO ZATÍŽENÍ A ÚNAVOVOU ŽIVOTNOST	62
7.2.1	Zkušební těleso A:.....	62
7.2.2	Zkušební těleso B:.....	62
7.2.3	Zkušební těleso C:.....	63
7.3	ZKUŠEBNÍ TĚLESA POSUZOVÁNA NA VLIV KLIMATICKÉHO ZATÍŽENÍ A NA ZÁKLADNÍ MECHANICKÉ VLASTNOSTI PŘI STATICKÝCH ZKOUŠKÁCH	63
7.3.1	Zkušební těleso A1:.....	63
7.3.2	Zkušební těleso B2:.....	64
7.3.3	Zkušební těleso C3:.....	64
8	MECHANICKÉ ZKOUŠKY ZKUŠEBNÍCH TĚLES	65
8.1	STATICKÉ ZKOUŠKY OHYBEM.....	65
8.1.1	Podmínky pro testování v klimatické komoře	66
8.1.2	Uspořádání statické zkoušky v ohybu.....	66
8.2	NAMĚŘENÁ A VYHODNOCENÁ DATA NA VLIV MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ PŘI STATICKÝCH ZKOUŠKÁCH.....	67
8.2.1	Porovnání základních mechanických vlastností a maximálního zatížení pro cyklické zkoušky $F_{o\ max}$	72
8.3	NAMĚŘENÁ A ZPRACOVANÁ DATA ZKUŠEBNÍCH TĚLES POSUZOVANÝCH NA VLIV KLIMATICKÉHO ZATÍŽENÍ NA MECHANICKÉ VLASTNOSTI PŘI STATICKÝCH ZKOUŠKÁCH.....	74
8.3.1	Zkušební tělesa bez klimatického zatížení	74
8.3.2	Zkušební tělesa s klimatickým zatížením	79
8.3.3	Vyhodnocení a porovnání výsledků zkušebních těles s klimatickým a bez klimatického zatížení	84
8.3.4	Statická zkouška těles pro testování cyklickým zatížením s vlivem a bez vlivu klimatického zatížení.....	85
8.4	CYKICKÉ ÚNAVOVÉ ZKOUŠKY	91
8.4.1	Vstupní parametry cyklické zkoušky	93

9	VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ CYKlickÝCH ZKOUŠEK.....	96
9.1	ZKUŠEBNÍ TĚLESO A: UD DELTAPREG VV430U 34%	96
9.1.1	Výsledky cyklického zatížení zkušební tělesa	96
9.2	ZKUŠEBNÍ TĚLESO B: UD CARBON IMP GV420U	99
9.2.1	Výsledky cyklického zatížení zkušební tělesa	99
9.3	ZKUŠEBNÍ TĚLESO C: HYBRIDNÍ DESKA	102
9.3.1	Výsledky cyklického zatížení zkušební tělesa	102
9.3.2	Výsledky statických zkoušek neporušených cyklicky zatížených těles- zbytková pevnost.....	105
9.4	CELKOVÉ SROVNÁNÍ POČTU CYKLŮ U JEDNOTLIVÝCH TIPŮ ZKUŠEBNÍCH TĚLES	107
9.4.1	Srovnání počtu naměřených cyklů pro zatížení 80% z maximální ohybové síly	107
9.4.2	Srovnání počtu naměřených cyklů pro zatížení 90% z maximální ohybové síly	108
9.4.3	Srovnání počtu naměřených cyklů pro zatížení 95% z maximální ohybové síly	108
9.5	VYHODNOCENÍ ZKUŠEBNÍCH TĚLES TESTOVANÝCH CYKlickÝM ZATÍŽENÍM S VlivEM A BEZ VlivU KLIMATICKÉHO ZATÍŽENÍ	109
9.5.1	Zkušební těleso UD Deltapreg 34% VV430U při zkušební hladině 80% z F_{max}	109
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	113
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	117
	SEZNAM OBRÁZKŮ	119
	SEZNAM TABULEK.....	124
	SEZNAM PŘÍLOH.....	126

ÚVOD

V dnešním moderním světě nás zahrnují stále nové progresivní možnosti a materiály pro výrobu veškerých komponentů v průmyslovém odvětví. Mezi těmito materiály dominují kompozity, které se využívají hojně v leteckém, automobilovém a vojenském průmyslu, dále také pro sportovní nářadí a spoustu dalších speciálních aplikací.

Mezi významné zástupce materiálů pro výrobu kompozitů se řadí prepregy. Použití prepregů má výhodu v tom, že je oddělen složitý proces prosycování výztuže pojivem od dalšího zpracování. Tento postup má poté velký vliv na kvalitu budoucího výrobku, který vykazuje velmi dobré mechanické a fyzikální vlastnosti jako jsou především nízká hmotnost, vysoká pevnost, vynikající životnost a velmi dobré únavové vlastnosti. Tyto kladné vlastnosti jsou však vykoupeny vysokou výrobní cenou, proto se tyto materiály používají u aplikací, kde cena nehraje až tak zásadní roli.

Tato diplomová práce se zabývá studiem únavového chování kompozitních materiálů na bázi prepregů a jejich vzájemným srovnáváním. V neposlední řadě jsou srovnávány také základní mechanické vlastnosti materiálů s vlivem změny klimatického prostředí. Teoretická část uvádí základní rozdělení kompozitních materiálů, materiály, které jsou nejčastěji používány pro výrobu kompozitů a únavové chování těchto materiálů. Část této práce je také věnována studii vlivu klimatického zatížení na mechanické a fyzikální vlastnosti materiálů. Praktická část zahrnuje popis materiálů pro výrobu zkušebních těles, výrobu zkušebních těles, srovnání základních mechanických a únavových vlastností zkušebních těles. V závěrečné části jsou vyhodnoceny všechna naměřená data jak ze statických tak z únavových zkoušek.

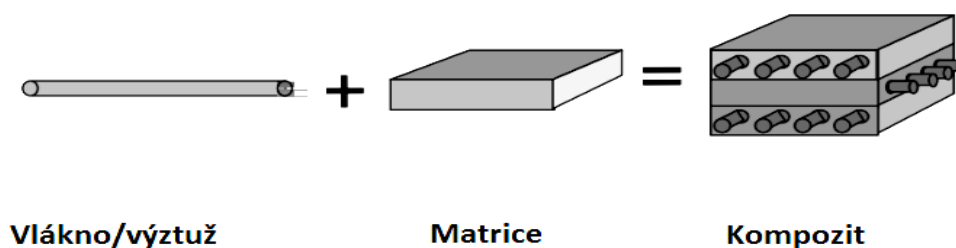
Cílem této diplomové práce je určit, který ze zkoušených materiálů vykazuje nejlepší odolnost proti únavovému namáhání a zároveň prověřit základní mechanické vlastnosti materiálů vystavených změně klimatického prostředí.

I. TEORETICKÁ ČÁST

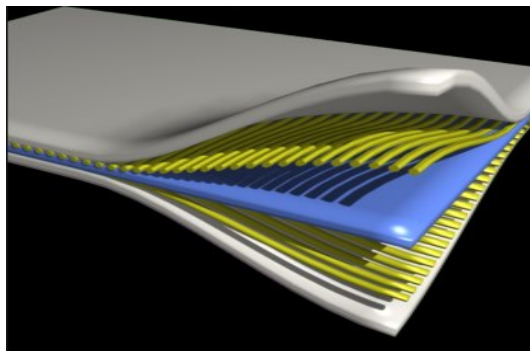
1 KOMPOZITNÍ MATERIÁLY

1.1 Základní údaje o kompozitech

Kompozitní materiál může být definován jako makroskopická kombinace dvou nebo více odlišných materiálů s rozpoznatelným rozhraním mezi nimi. Tyto materiály mají odlišné chemické, fyzikální a mechanické vlastnosti. Spojením těchto materiálů vznikne zcela nový s výjimečnými vlastnostmi. Tyto vlastnosti nelze dosáhnout pouze jednou složkou výsledného materiálu. Houževnatější součást kompozitů se nazývá výztuž. Tvárná a pružná součást, která zároveň slouží, jako pojivo výztuže se nazývá matrice. Mechanické vlastnosti výztuže jsou výrazně lepší než u matrice, z toho vyplývá, že výztuž má za úkol zlepšovat například modul pružnosti, pevnost, tvrdost a další vlastnosti těchto materiálů. Jelikož se kompozity obvykle používají pro své strukturní vlastnosti, definice může být omezena pouze na ty materiály, které obsahují výztuž podporovanou spojovacím materiálem. Kompozity mají tedy typicky diskontinuální fázi z vláken nebo částic, která je tužší a silnější než fáze spojité matrice. [1],[2]



Obrázek č. 1 Skladba kompozitního materiálu [3]



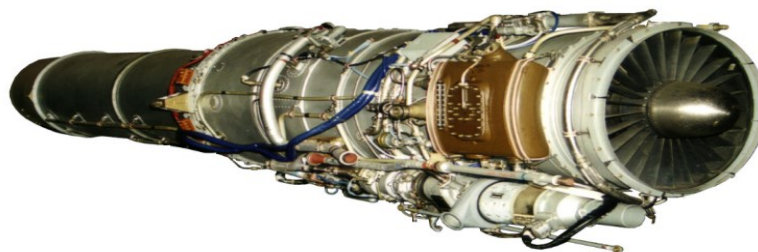
Obrázek č. 2 Kompozitní materiál [5]

1.2 Rozdělení kompozitních materiálů

Kompozitní materiály můžeme dělit podle různých způsobů. Jeden z těchto způsobů je podle geometrie vlákna na **částicové** a **vláknité**. Další způsob je rozdělení podle **matrice** a **výztuže**.

1.2.1 Rozdělení podle geometrie vláken:

- **Částicové kompozity:** použití ve výrobě v automobilovém průmyslu, v jaderné energetice, strojním průmyslu a v leteckém průmyslu, jsou používány například jako součásti turbínových motorů [5]

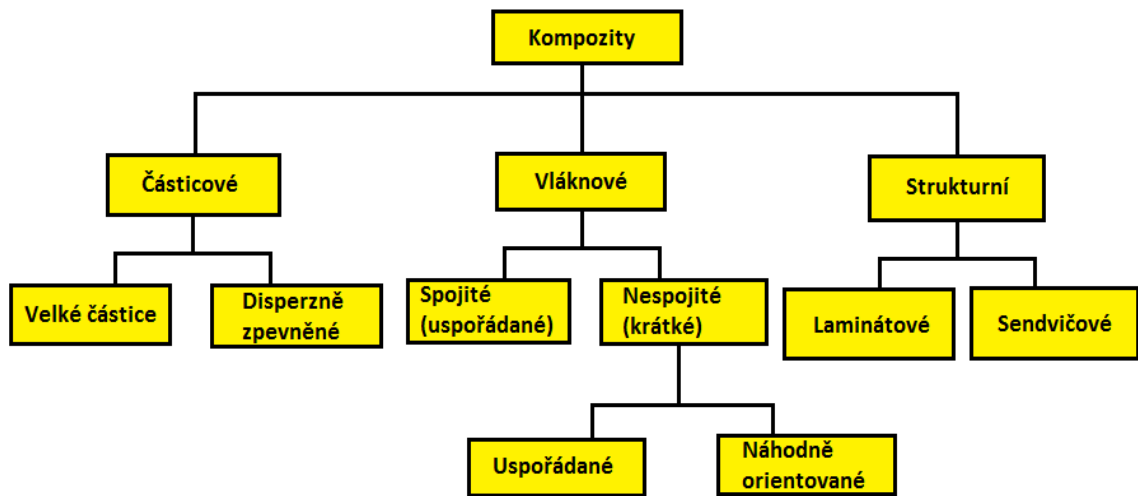


Obrázek č. 3 Turbinový motor [10]

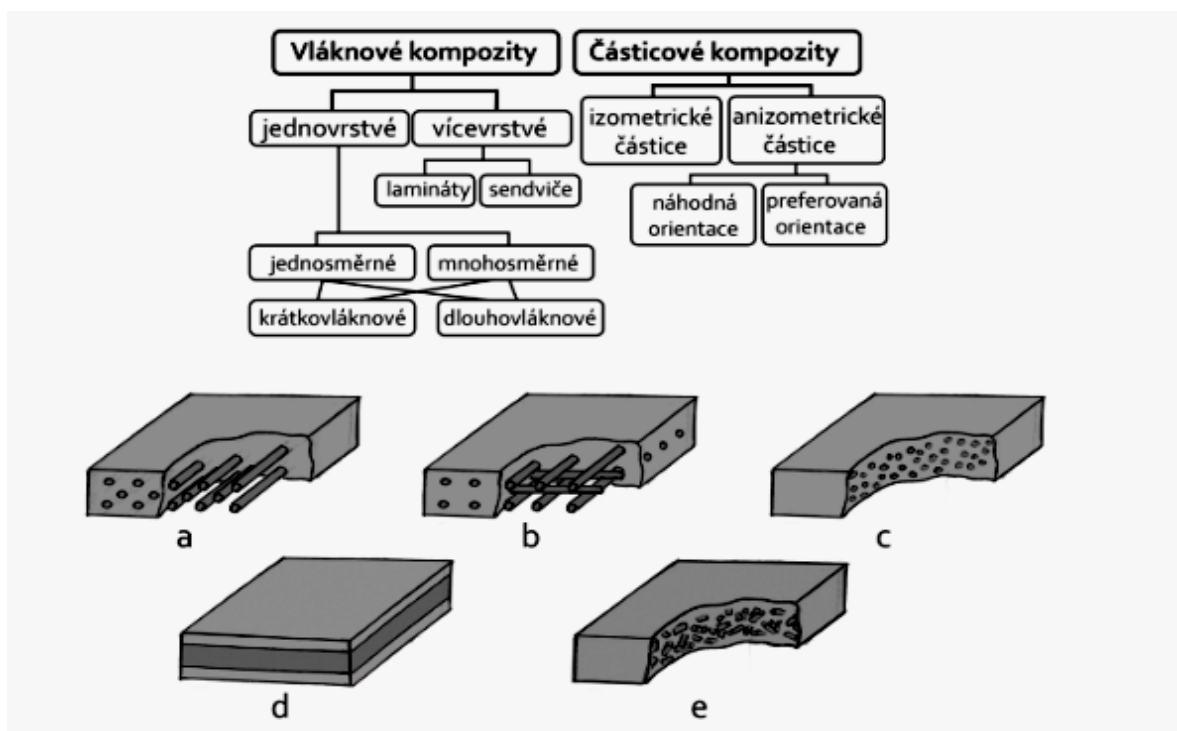
- **Vláknové kompozity:** jsou používány v letectví, v automobilovém průmyslu, v kosmonautice a ve sportovním odvětví (hokejky, golfové hole, lyže, rybářské pruty aj.) [5]



Obrázek č. 4 Kompozitní hůl namáhaná při střele Jaromíra Jágra [6]



Obrázek č. 5 Rozdělení kompozitních materiálů



Obrázek č. 6 Rozdělení kompozitů z hlediska geometrie a orientace plniva a příklady struktur kompozitu: a) jednosměrně orientovaný dlouhovláknový kompozit, b) kompozit s dvou- směrnou výztuží, c) časticový kompozit, d) vrstvený (sendvičový) kompozit, e) krátkovláknový kompozit s náhodně orientovanými vlákny [7]

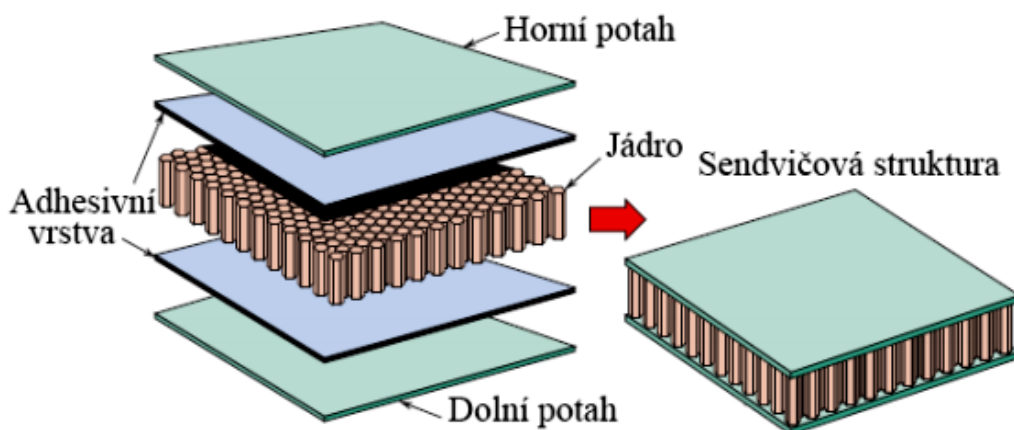
1.2.2 Rozdělení podle výztuže:

- **Jednovrstvé kompozity:** tvořeny z kontinuálních vláken (prepregy) jako jednosměrné, nebo dvou až pěti dimenzionální (tkaniny, rohože, splétané textilie) [1]



Obrázek č. 7 Prepregový díl [8]

- **Vícevrstvé kompozity:** speciální druh vrstvených kompozitních konstrukcí, je to kombinace odlišných materiálů, které navzájem využívají výhody jednotlivých složek, patří k nim lamináty a sendviče (polymerní pěny, voštiny) [1]



Obrázek č. 8 Sendvičová struktura [9]

1.3 Druhy výztuží

Výztuž

Hlavním účelem výztuže je poskytnout kompozitu vynikající úroveň pevnosti a tuhosti. V kompozitním materiálu vyztuženém kontinuálními vlákny poskytují vlákna prakticky celou pevnost a tuhost.

1.3.1 Vláknové výztuže

Hlavní charakteristikou vláken je, že jejich pevnost v tahu ve směru osy a s tím i modul pružnosti, který je mnohem vyšší než v kolmém směru k dané ose. Kompozitní materiály vyztužené vlákny proto výrazně převyšují pevnosti obvyklých slitin.

Důvody vysoké pevnosti vláken:

- snížení velikosti a pravděpodobnosti výskytu mikrotrhlin a dutin ve vláknech, z tohoto důvodu se pevnost vláken zvyšuje se zmenšujícím se průměrem
- směrování poškození vláken ve směru osy vláken, z tohoto důvodu je poškození ve směru osy výrazně méně škodlivé než poškození orientované kolmo na směr osy vláken
- směrování pevných vazeb ve směru osy vláken (uhlíkové a polymerní vlákna) [1], [11]

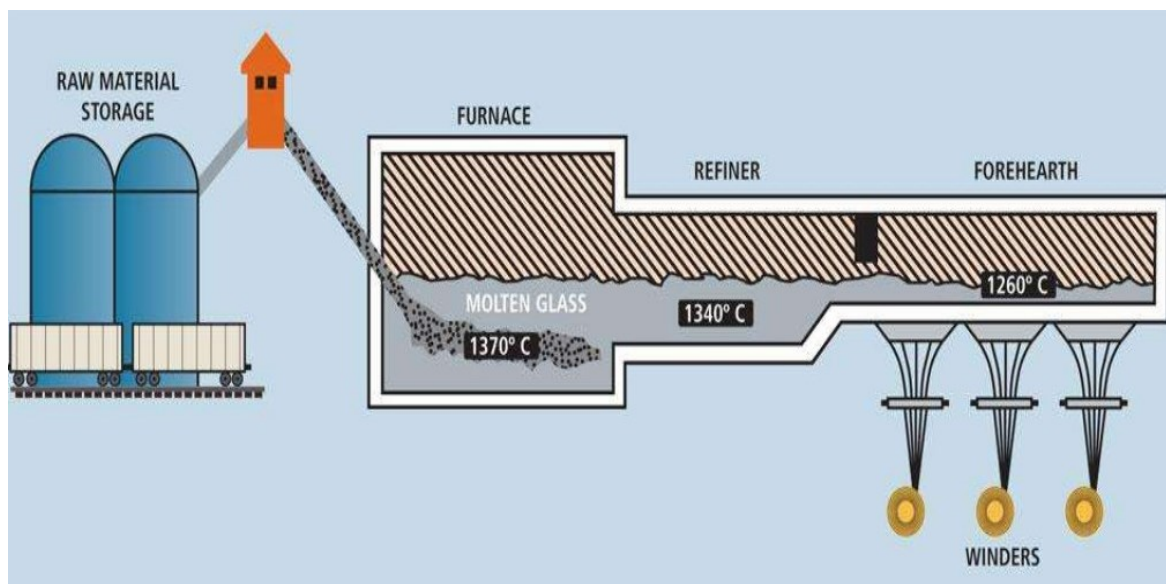
Skleněné vlákno (GF-glass fiber)

Skelné vlákna (\varnothing 3,5 až 25 μ m) patří mezi nejrozšířenější průmyslové materiály, které jsou dnes známé. Vykazují užitečné vlastnosti, jako jsou tvrdost, odolnost proti chemickému napadení a inertnost. Skleněná vlákna se používají při výrobě konstrukčních kompozitů, desek s plošnými spoji a širokou škálou speciálních výrobků. Téměř všechna nekonečná skleněná vlákna jsou vyráběna přímým tažením a jsou tvořena vytlačováním roztaveného skla přes pouzdro z platinové slitiny, které může obsahovat až několik tisíc jednotlivých otvorů, z nichž každý má v průměru od 0,173 do 3,175 mm. Skleněná vlákna z bezalkalické skloviny jsou vynikajícím elektrickým izolantem s vysokou propustností pro záření, proto se označují jako E-sklovina. Je to nejčastěji používaný druh skloviny pro výrobu vláken, který postupně jako standardní typ obsadil 90 % trhu.

Dalšími typy skloviny jsou například R-sklovina (evropské označení), která má o 40-70 % vyšší pevnost než E-sklovina. Dále se vyrábí C-sklovina s vysokou odolností proti kyselinám a proti chemicky agresivním látkám.[1],[12]



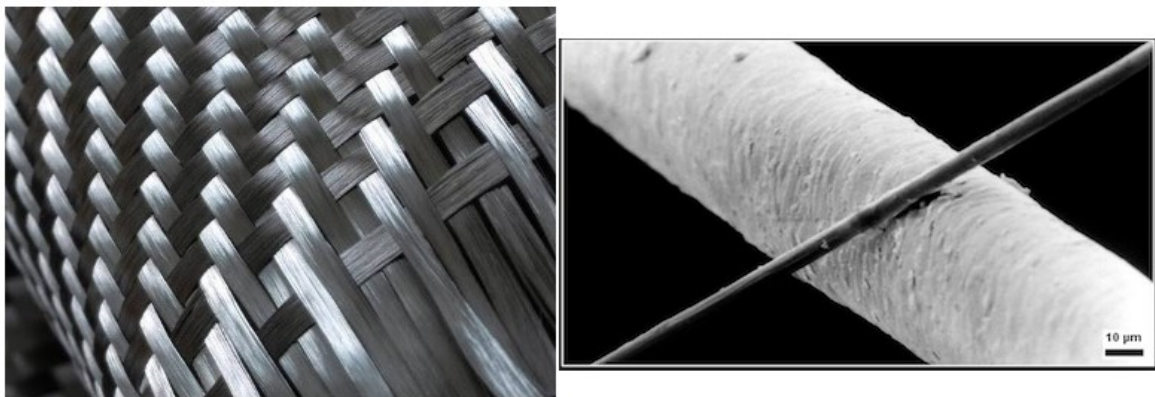
Obrázek č. 9 Skelná vlákna [9]



Obrázek č. 10 Výroba skelných vláken [13]

Uhlíková vlákna (CF-Carbon fiber)

Uhlíková vlákna (\varnothing 5 až 10 μ m) jsou technická vlákna s extrémně vysokou tuhostí a pevností, ale s nízkou tažností. E – modul a pevnost se mohou měnit v širokém rozsahu. Teoreticky možné hodnoty mechanických vlastností ve směru vrstev dosahují až 1 000 000 $N \cdot mm^{-2}$ pro E- modul a 100 000 $N \cdot mm^{-2}$ pro pevnost. Výchozí organické struktury ve vláknitém stavu jsou nejprve karbonizovány. Při tomto procesu se odštěpí všechny prvky až na uhlík. Se stoupající teplotou, a tím se zvyšující se grafitizací se zlepšují mechanické vlastnosti. Při teplotě nad 1800 °C je tvorba grafitové struktury ukončena. Velká část uhlíkových vláken (90%) je vyrobena z polyakrylonitrilových vláken – PAN. [1],[14]



Obrázek č. 11 Karbonová vlákna v detailním pohledu [15]

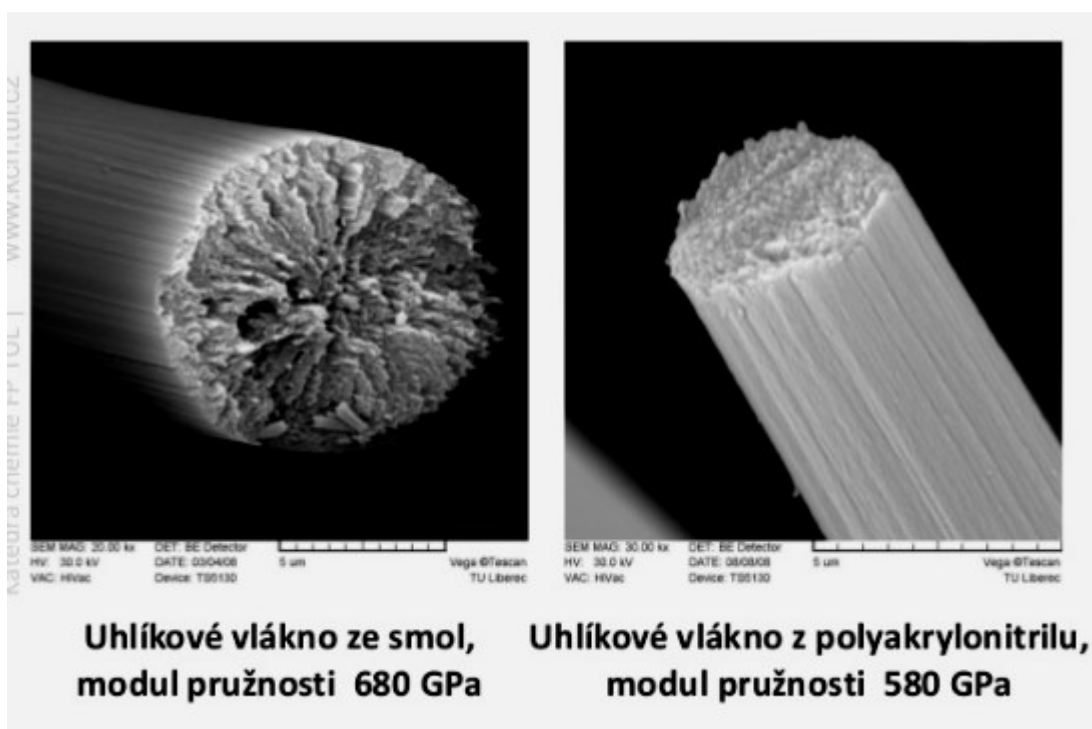


Obrázek č. 12 Pracovní linka pro výrobu vláken PAN [16]

Uhlíková vlákna se rozdělují podle hodnoty modulu pružnosti a pevnosti:

- vysokopevnostní uhlíková vlákna HS (high strength) karbonizace při teplotách 1000 - 1500 °C
- grafitová vlákna při karbonizaci o teplotě 2000 – 2800 °C, mají menší pevnost v tahu, ale vysoký modul pružnosti v tahu HM (high modul)

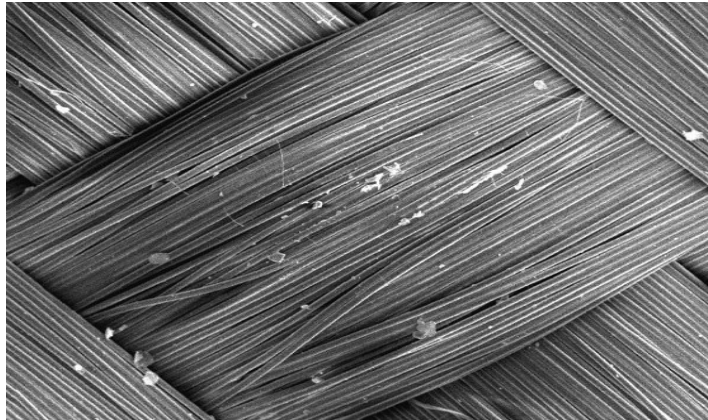
Jejich využití je všestranné například v automobilovém průmyslu, leteckém průmyslu a ve sportovním odvětví.[1], [14]



Obrázek č. 13 Uhlíková vlákna ze smol a z polyakrylonitrilu [17]

Aramidová vlákna (AF-Aramid fiber)

Aramidová vlákna mají nejvyšší poměr pevnosti k hmotnosti, jejich původ je na bázi lineárních organických polymerů. Obchodním názvem těchto vláken je Kevlar. Původní zaměření kevlaru bylo pro zpevnění pneumatik a plastů. Jeho charakteristická nízká hmotnost a vysoká houževnatost a pevnost vedla k vývoji aplikací v kompozitních materiálech, ve výrobě lan a pneumatik a v neposlední řadě v balistice.[1], [18]



Obrázek č. 14 Kevlarová vlákna pod mikroskopem [18]

1.3.2 Podoba výztuží

- **Příze:** vyrábí se spřádáním z vláken a dále se zpracovává na tkaniny, pásy a pletené výrobky
- **Nitě:** vyrábí se jedno, nebo víceštrňové, skládají se z jedné, nebo více přízí, které jsou společně předeny
- **Roving (pramenec):** skládá se z 20 až 60 konců, sdružených z rovnoběžně uložených nestočených vláken, nebo tažených přímo z taveniny (6 až 12 000 elementárních vláken). Zpracovává se buď sekáním, nebo tkaním, navíjením, nebo tažením nekonečného pramene
- **Rohože ze sekaných pramenců:** netkané plošné výrobky o hmotnosti 300 až 900 $g \cdot m^{-2}$. Vyrábějí se z 25 nebo 50 mm dlouhých sekaných vláken nepravidelně plošně uložených. Vlákna jsou uložena do vrstev, postříkána pojivem a po vysušení v pásové sušárně spojena tak, že je možno vzniklou rohož navíjet do rolí, které jsou připraveny pro další použití
- **Rohože z kontinuálních vláken:** skládají se z nekonečných skleněných vláken, která jsou uložena nepravidelně bez jakékoliv orientace ve smyčkách v několika vrstvách a jsou vzájemně spojena pojivem

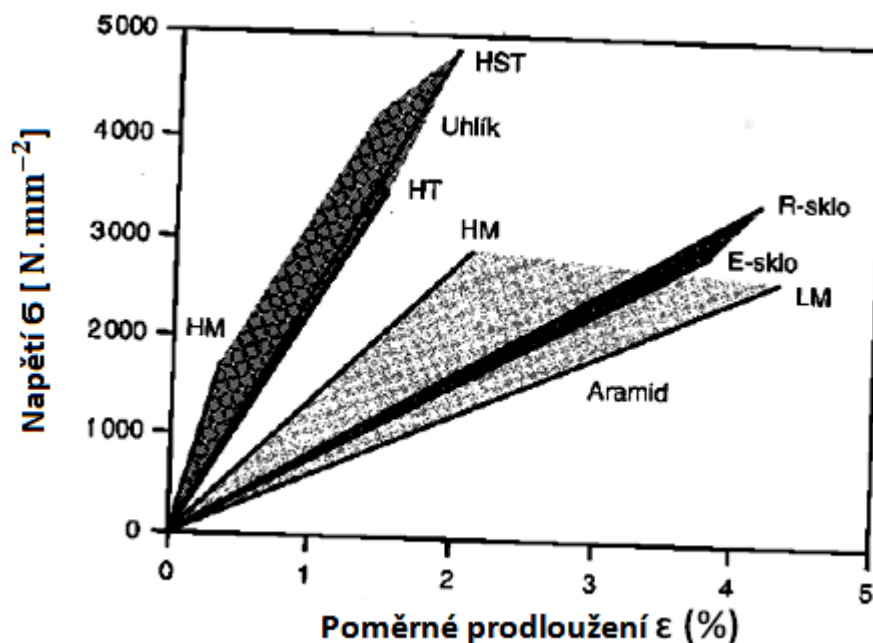
- **Povrchové rohože:** netkané plošné výrobky o hmotnosti 20 až 50 $g \cdot m^{-2}$ ze skleněných, nebo termoplastických vláken, které se pokládají do vrchní vrstvy laminátu s vysokým obsahem pryskyřice, aby se zamezilo vzniku trhlin. Tyto rohože zvyšují odolnost proti obroušení. Rohože z C a ERC – skloviny dobře odolávají kyselým a alkalickým roztokům. Lepší odolnost prokazují dobře vyrobené tenké vrstvy- **gel-coaty** o tloušťce 0,3 až 0,6 mm
- **Tkaniny:** plošné výrobky z vláken nebo pramenců uložených pravoúhle v útku a osnově, které působí vyztuženě v obou směrech. Zvýšením polohy vláken v osnově vznikají rozdílné typy křížení vláken, které se nazývají vazby. Rozeznáváme různé druhy typů těchto vazeb.[1], [14]



Obrázek č. 15 Základní druhy vazeb [19]

1.3.3 Porovnání vláken

Vlastnosti vláken lze porovnávat z deformačního chování jednosměrně vyztužených laminátů při stejném obsahu vláken, namáhaných rostoucím tahovým napětím ve směru osy vyztuže. U tohoto porovnávání lze vyztužením upozorovat, že uhlíková vlákna vykazují nejvyšší hodnoty pevnosti a tuhosti. [20]



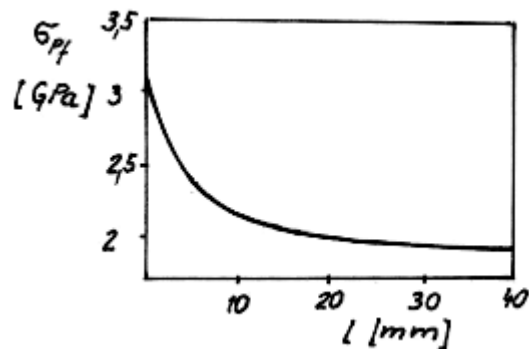
Obrázek č. 16 Vliv vlastností různých druhů skleněných, uhlíkových a aramidových vláken na průběh zatěžovacího diagramu jednosměrně vyztuženého laminátu [1]

Materiálové a pevnostní charakteristiky vláken jsou závislé na přítomnosti nadkritických poruch, kde dojde ke vzniku trhliny a odkud se trhlina šíří, než dojde k finálnímu lomu. Tyto skutečnosti vyjadřuje tzv. **Griffitův vztah**, který má tvar:

$$\sigma_{pf} = A + \frac{B}{d}$$

Kde A a B jsou materiálové konstanty a d je průměr vlákna. Tento vztah má omezenou platnost v krajní poloze. $d \rightarrow 0$ by pevnost stoupala nad všechny meze $\sigma_{pt} \rightarrow \infty$. Pro zajímavost dosahují nejvyšší pevnosti **whiskery** (monokrystalická kovová vlákna). [20]

Následující graf ukazuje závislost experimentálně zjištěná závislost σ_{Pf} na délce vlákna l pro tenké skleněné vlákno typu E o průměru $d = 5-20 \mu m$.



Obrázek č. 17 Závislost meze pevnosti vlákna σ_{Pf} na jeho délce [20]

Pro přehledné porovnání uvádím tabulku mechanických vlastností vybraných vláken. Kde E_t je modul pružnosti v tahu, σ_{Pt} pevnost v tahu, ρ hustota, σ_{Pt} / ρ měrná pevnost a $\varepsilon_{f, krit}$ je tažnost.[20]

Tabulka č. 1 Mechanické vlastnosti vybraných vláken [20]

	E_t	σ_{Pt}	ρ	σ_{Pt} / ρ	$\varepsilon_{f, krit}$
	GPa	MPa	10^3 kgm^{-3}	MPa / kgm^{-3}	%
Sklo - E	72,4	3500	2,54	1,38	2,5
Sklo - S	85,5	4600	2,48	1,85	2,5
Grafit - E	390	2100	1,9	1,1	0,7
Grafit - S	240	2500	1,9	1,3	0,7
Bor	385	2800	2,63	1,1	0,8
W	414	4200	19,3	0,22	
Aramid Kevlar 49	130	2800	1,5	1,87	2,5
Azbest	160	3100	2,56	1,21	1,9
SiC	250	2200	2,6	0,85	0,9
Polyethylen PE Spektra	172	3000	0,97	3,09	1,7
Ocel	210	340-2500	7,8	0,0440-0,321	

1.3.4 Částicové výztuže

Částicové výztuže se především aplikují pro kompozitní materiály s termoplastickými maticemi. Pro tyto výztuže se používají mikromleté materiály. Obsahují především hlinitokřemičitany jako je mastek a kaolin, vrstvené hlinitokřemičitany zastupují slídy a uhličitany především vápenec a těživec. Pro vylepšení otěru vzdornosti a kluzných vlastností se kombinují částice bronzu s částicemi molybdenu, sulfidu, grafitu a polytetrafluoretylenu. U těchto kompozitů se modul pružnosti zvyšuje s obsahem plniva.[21]



Obrázek č. 18 Rozdělení částicových kompozitů [22]

1.4 Matrice

1.4.1 Úloha matrice a její druhy

Pod pojmem matrice se rozumí materiál, který je prosycen systémem vláken tak, že po zpracování vznikne tvarově stálý výrobek. Vzniklá surovina se nazývá **kompozit**.

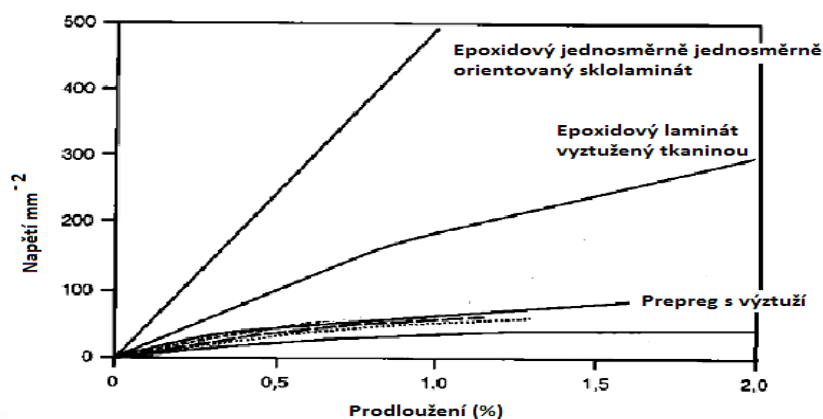
Hlavním úkolem matrice je zaručení geometrického tvaru, zavedení a přenos sil a ochrana vláken, to znamená:

- přenos namáhání na vlákna
- převedení namáhání z vlákna na vlákno
- zajištění geometrické polohy vláken a tvarové stálosti výrobku
- ochrana vlákna před vlivy prostředí

Zásadním hlediskem pro kvalitu kompozitu je zajištění adheze na fázovém rozhraní matrice – vlákno. Pro dosažení lepší fyzikální i chemické vazby mezi vláknem a matricí se nanese na vlákno apretace vhodná pro určitý druh matrice. Matrice musí mít vhodnou viskozitu a povrchové napětí, aby vlákno smočila úplně a bez bublin, které znehodnocují matrici. U polymerních kompozitních materiálů se matrice dělí na **termosety** (reaktoplasty) a **termoplasty**. [23]

Tabulka č. 2 Porovnání viskozit termoplastových tavenin a kapalných reaktivních pryskyřic při typických zpracovatelských teplotách [1]

Matrice	Teplota zpracování	Viskozita při teplotě zpracování
Nevyztužená nenasycená polyesterová pryskyřice (UP-R) vytvrzovaná za studena	10-40 °C	stovky mPa.s
Nenasycená polyesterová pryskyřice (UP-R) vytvrzovaná za tepla (např. SMC pasta)	140°C	1 000 mPa.s
Nevyztužená epoxidový pryskyřice (EP-R) vytvrzována za tepla	např. 130°C	stovky mPa.s
Polypropylen	200-270°C	10 ³ Pa.s



Obrázek č. 19 Diagram napětí-prodloužení vyztužených kompozitů s termosetickou a termoplastickou matricí [1]

1.5 Reaktivní pryskyřice

Reaktivní pryskyřice tvoří skupinu termosetů nejčastěji používanou při výrobě kompozitních materiálů. Jsou to kapalné, nebo tavitelné pryskyřice, které se, buď samostatně, nebo za pomoci jiných složek (tavidel, katalyzátorů, urychlovačů) vytvrzují polymerací. Reaktivní pryskyřice se nazývají také licí, laminační, impregnační, prosyrovací, nebo zalévací.[1]

Mezi nejdůležitější typy reaktivních pryskyřic patří:

- **Nenasycené polyesterové pryskyřice (UP-R)** – jednou jejich složkou je nenasycená karbová kyselina a nejméně jednou další složkou je alkohol
- **Vinylesterové pryskyřice (VE-R)**
- **Epoxidové pryskyřice (EP-R)** – obsahují dostatečné množství epoxidových skupin potřebných pro vytvrzení
- **Fenolické pryskyřice** – vyrábějí se kondenzací fenolů a vhodných roztoků aldehydů
- **Metakrylátové pryskyřice (MA-R)** – vyrábějí se z polymerizovatelné směsi polymerních a monomerních esterů kyseliny metakrylové [1]

1.5.1 Nenasycené polyesterové pryskyřice

Tyto reaktivní pryskyřice jsou bezbarvé, až slabě nažloutlé roztoky v reaktivních rozpouštědlech, které je možno vytvrzovat za normální, nebo zvýšené teploty. Při vytvrzování se uvolňuje reakční teplo a dochází k objemovému smrštění o 5 až 9 %. [1]

Typické vlastnosti nenasycených polyesterových pryskyřic:

- levné, spolehlivé a mnohostranně použitelné licí pryskyřice
- velká variabilita při zpracování, možnosti volby obsahu jednotlivých složek (styrenu, katalyzátoru, urychlovače)
- velké smrštění při zpracování (6 až 9 %), z velké části po zgelovatění
- dobrá odolnost proti povětrnostním podmínkám
- velké nároky na životní prostředí, působením styrenu [1]

1.5.2 Vinylesterové pryskyřice (VE-R)

Vinylesterové pryskyřice se zpracovávají stejně jako nenasyčené polyesterové pryskyřice. Jsou většinou rozpuštěny ve styrenu a obsahují reaktivní dvojné vazby. Řadí se taktéž mezi termosety a jsou vhodné pro výrobu kompozitních materiálů vyztuženými skleněnými i uhlíkovými vlákny. Jsou určeny pro náročné aplikace v chemicky agresivním prostředí a pro aplikace, kde dochází k velkému mechanickému zatížení. Tyto kompozity se vyznačují taktéž výbornou trvanlivostí v oblasti těžebního a ropného průmyslu.

Typické vlastnosti vinylesterových pryskyřic:

- ve srovnání s nenasyčenými polyesterovými pryskyřicemi jsou houževnatější a dražší
- velká variabilita při zpracování pomocí dávkování styrenu a urychlovače
- aplikace v korozním prostředí
- zatížení životního prostředí styrenem

1.5.3 Epoxidové pryskyřice (EP-R)

Epoxidové pryskyřice jsou za normální teploty kapalné až pevné látky, které mohou obsahovat přidané pomocné látky, jako jsou rozpouštědla. Patří mezi velmi hodnotné termosety s velice dobrými mechanickými vlastnostmi, vysokou rozměrovou stálostí a přilnavostí k podkladu. Pouze 8 % se zpracovává ve formě vyztužených kompozitů. Důležitými aplikacními oblastmi jsou zalévací hmoty pro elektrotechniku, výroba forem a nástrojů a různé povlaky, zejména pro práškové nanášení.[1]

Typické vlastnosti epoxidové pryskyřice:

- cenově nejsou tak výhodné jako nenasyčené polyesterové pryskyřice, jsou 3x až 4x dražší
- musí být dodržen přesný poměr mísení pryskyřice/tvrdidlo
- vzhledem k velmi dobrým mechanickým vlastnostem zejména při dynamickém namáhání jsou vhodné jako matrice pro vysoko pevnostní uhlíková vlákna
- dobrá adheze k mnoha druhům podkladu (lepidlo)[1]

Tabulka č. 3 Závislost mechanických vlastností epoxidové pryskyřice na teplotě [20]

Teplota	ρ	E_t	σ_{Pr}	$\varepsilon_{f,krit}$
$^{\circ}C$	$10^3 kgm^{-3}$	GPa	MPa	%
25	1,22	2,8	95,1	5,5
120	1,22	2,1	46,2	9,6

1.5.4 Fenolické pryskyřice (PF-R)

Fenolické pryskyřice jsou reaktivní pryskyřice, které se vyrábějí kondenzací fenolů a 30 až 50 % vodných roztoků aldehydů (zejména formaldehydu). Jednotlivé varianty vycházejí z různých druhů fenolických surovin, různých molárních poměrů jako například fenol /formaldehyd a z různých chemických nebo fyzikálních modifikací. Teplota zpracování těchto pryskyřic se pohybuje v rozmezí 150-210 $^{\circ}C$. Tyto pryskyřice se aplikují ve výrobě kompozitních profilů, brusných segmentů, jako hlavní složka lepidel pro laminování dřeva a při výrobě brzdových destiček. [1]

Typické vlastnosti fenolických pryskyřic:

- jejich podíl na celkové výrobě klasických vyztužených kompozitů je nízký
- jsou vysoce tepelně a chemicky odolné a tvarově stálé
- mají příznivé chování při požáru a při zachování vysoké zbytkové pevnosti, aplikace v dopravních prostředcích

Tabulka č. 4 Mechanické vlastnosti vybraných termosetů [20]

	ρ	E_t	σ_{Pr}	$\varepsilon_{m,krit}$
	$10^3 kgm^{-3}$	GPa	MPa	%
Epoxidová pryskyřice	1,1-1,4	2,1-6,0	35-90	1-10
Polyestery	1,1-1,5	1,3-4,5	45-85	1-5
Fenolické pryskyřice	1,3	4,4	50-60	1-3
Polyimidy (až do teploty 350 $^{\circ}C$)	1,2-1,9	3,0-3,1	80-190	2-40

1.5.5 Porovnání základních mechanických vlastností VÝZTUŽE a MATRICE

Tabulka č. 5 Základní mechanické vlastnosti vybraných výztuží [1]

Typ vlákna	Sklo	Aramid	HS-uhlík	HM-uhlík
Modul pružnosti v podélném směru E_{fL} [Mpa]	74 000	130 000	230 000	390 000
Modul pružnosti v příčném směru E_{fT} [Mpa]	74 000	5 400	15 000	6 000
Modul pružnosti ve smyku G_{FLT} [Mpa]	30 000	12 000	50 000	20 000
Pevnost v tahu σ_{fL} [Mpa]	2 100	3 000	5 000	3 800

Tabulka č. 6 Základní mechanické vlastnosti vybraných matic [1]

Druh pryskyřice	Epoxidové	Polyesterové	Fenolové	Polyimidové
Modul pružnosti E_m (Mpa)	4 500	4 000	3 000	4 000 - 19 000
Modul pružnosti ve smyku G_m (Mpa)	1 600	1 400	1 100	1 100
Pevnost v tahu σ_{pm} (Mpa)	130	80	70	70
Maximální teplota T_{max} (°C)	90 - 200	60 - 100	120 - 200	250 - 300

1.6 Mechanické vlastnosti vláknových kompozitů

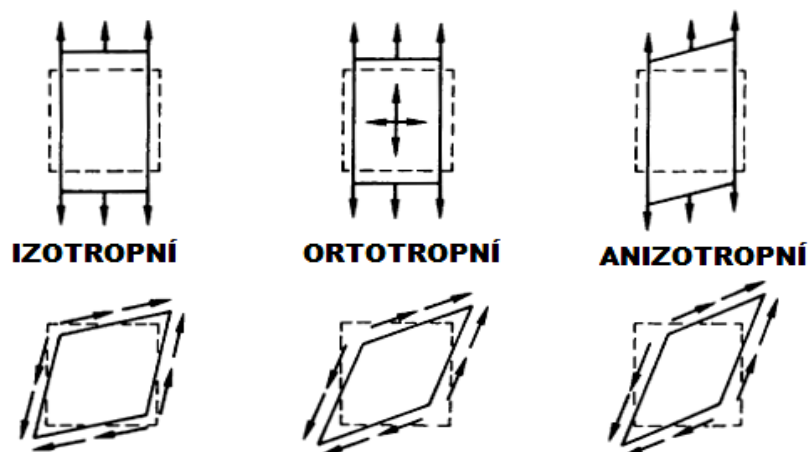
Základní úlohou mechaniky kompozitních materiálů je stanovení mechanických charakteristik (deformačních a pevnostních) na základě známých mechanických charakteristik složek, při definované struktuře a objemovém složení kompozitu.

Kompozitní materiály mají mnoho charakteristik mechanického chování, které se liší od konvekčních inženýrských materiálů. Některé vlastnosti jsou pouze modifikace konvekčního chování, jiné jsou zcela nové a vyžadují nové analytické a experimentální pokusy.

Nejběžnější technické materiály jsou homogenní a izotropní:

- homogenní těleso má celistvé vlastnosti, to znamená že, vlastnosti jsou nezávislé na poloze v těle tělesa
- izotropní těleso má vlastnosti materiálu, které jsou stejné v každém směru v bodě tělesa

Naproti tomu jsou kompozitní materiály často **nehomogenní**, **ortotropní**, nebo také **anizotropní**. **Nehomogenní těleso** má na různých místech nerovnoměrné vlastnosti, tyto vlastnosti pak závisí na poloze v tělese. **Ortotropní těleso** má vlastnosti materiálu, které se liší ve třech vzájemně na sebe kolmých rovinách v každém bodě tělesa. **Anizotropní těleso** má materiálové vlastnosti odlišné ve všech směrech v každém bodě tělesa. Tyto vlastnosti opět závisí na orientaci a na bodě v tělese.[20],[25]



Obrázek č. 20 Rozdělení kompozitních materiálů z hlediska mechanických vlastností[22]

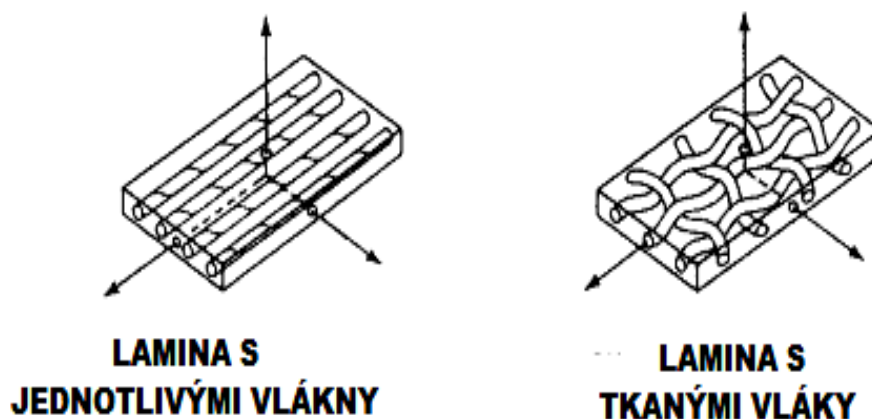
Vzhledem k přirozeně heterogenní povaze kompozitních materiálů jsou studovány mechanické vlastnosti ze dvou hledisek a to z hlediska **mikromechaniky** a **makromechaniky**.

Mikromechanika je studie vlastností laminy, vychází z jednotlivých poznatků o orientaci a uspořádání vláken, také o geometrii a mezifázové adhezi výztuže. Tyto výpočty jsou nezbytné k odhalování materiálových vlastností a umožňují vypočítat faktory, které limitují vlastnosti kompozitních materiálů při jejich zlepšování.

Makromechanika se zabývá výpočty mnohvrstvého kompozitního materiálu na základě vlastností každé z jednotlivých vrstev. K provedení těchto výpočtů musí být známi také údaje o počtu vrstev, orientaci, tloušťce a uspořádání lamin. Výpočty umožňují eliminovat nesprávné řešení při navrhování konstrukcí, či jiných výrobků. Navrhnu optimální řešení, počet vrstev a jejich orientaci vzhledem k aktuálnímu působícímu namáhání.[20]

1.6.1 Anizotropie laminy

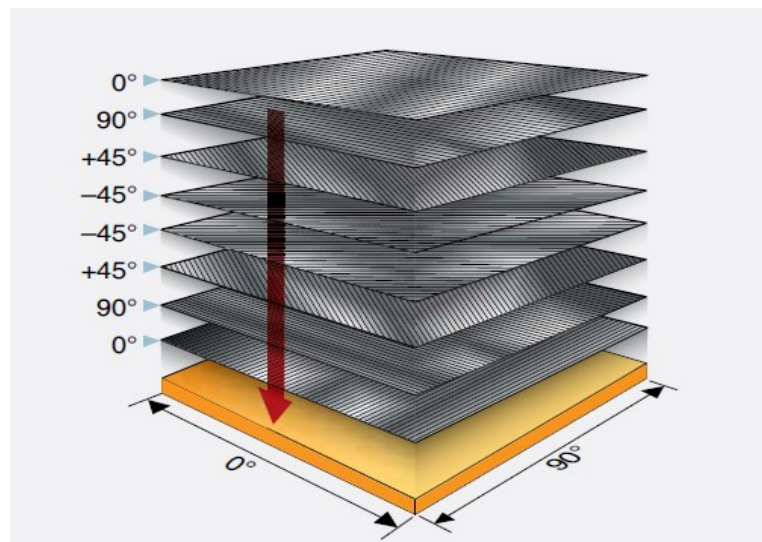
Základním stavebním kamenem laminátu je lamina, která je plochá, někdy také zakřivená jako ve skořápce. Vlákna jsou uspořádána jednosměrně, nebo vetkána do matrice. Vlákna jsou hlavní výztuží a nosiči napětí, jsou typicky tuhé a silné. Matrice může být kovová, keramická, uhlíková, nebo organická.[20],[26]



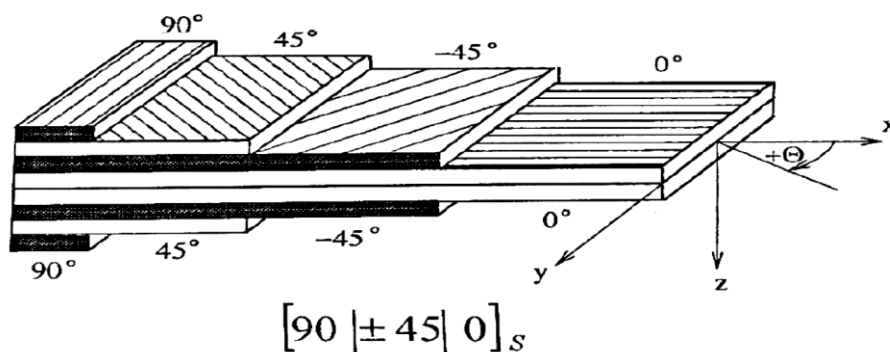
Obrázek č. 21 Matrice s jednotlivými a tkanými typy vláken[20]

Jednotlivá lamina obsahuje výztužnou vrstvu, buď více směrnou, nebo jednosměrnou. Výsledná struktura, kterou nazýváme laminát, vzniká kladením jednotlivých vrstev na sebe. Tyto vrstvy mají obvykle odlišnou orientaci, vlastnosti a určují výslednou vlastnost laminátu. Kompozitní materiál vykazuje z pravidla nejvyšší tuhost a pevnost ve směru vyztužujících vláken. Tuto skutečnost nazýváme anizotropií.

Lamináty mohou být složeny z desek z různých materiálů, nebo v daném kontextu vrstvy z vyztužených vláken. Hlavním účelem laminátu je přizpůsobení směrové závislosti, pevnosti a tuhosti kompozitního materiálu tak aby odpovídal prostředí vyloženého pro konstrukci prvku. Lamináty jsou jedinečně vhodné pro tento cíl, protože každá vrstva může být orientována podle dané potřeby.[12],[20]



Obrázek č. 22 Pohled na rozloženou konstrukci laminátu[12]



Obrázek č. 23 Příklad vrstvení jednotlivých lamin[26]

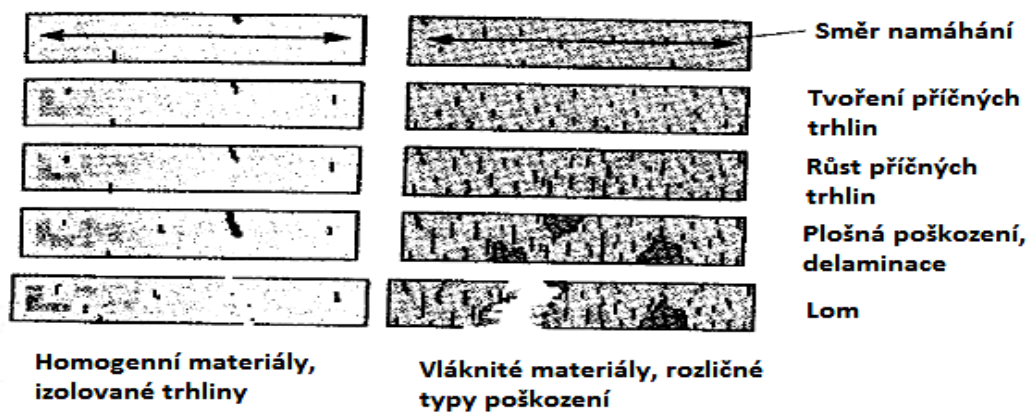
2 ÚNAVOVÉ NAMÁHÁNÍ KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ

Únava materiálu je degradační proces nevratných změn vlastností a stavu materiálu vyvolaným jeho opakovaným mechanickým, tepelným, nebo tepelně-mechanickým zatěžováním za současného spolupůsobení dalších faktorů. K únavovému porušení materiálu může docházet při jeho zatěžování časově proměnlivými vnějšími vlivy. Postupné hromadění poškození při opakovaném kmitavém cyklickém, tepelném nebo mechanicko-tepleném namáhání tělesa se označuje jako **proces únavy**.

Mezním stavem únavové pevnosti vysvětlujeme stav materiálu, při kterém dojde k poškození funkčních vlastností součásti vlivem časově proměnných zatížení. Kompozitní materiály vyztužené dlouhými vlákny na jedné straně umožňují navrhnutí optimální struktury s hlediskem na předpokládaný způsob namáhání, na druhé straně však důsledkem jejich mikroskopické i makroskopické heterogenní struktury (náhlé změny tuhosti na rozhraní matrice a vláken mezi různými vrstvami, směrově závislé mechanické charakteristiky) existují značná různost ve způsobu a průběhu narušování.[1],[27]

2.1 Poškození kompozitních materiálů

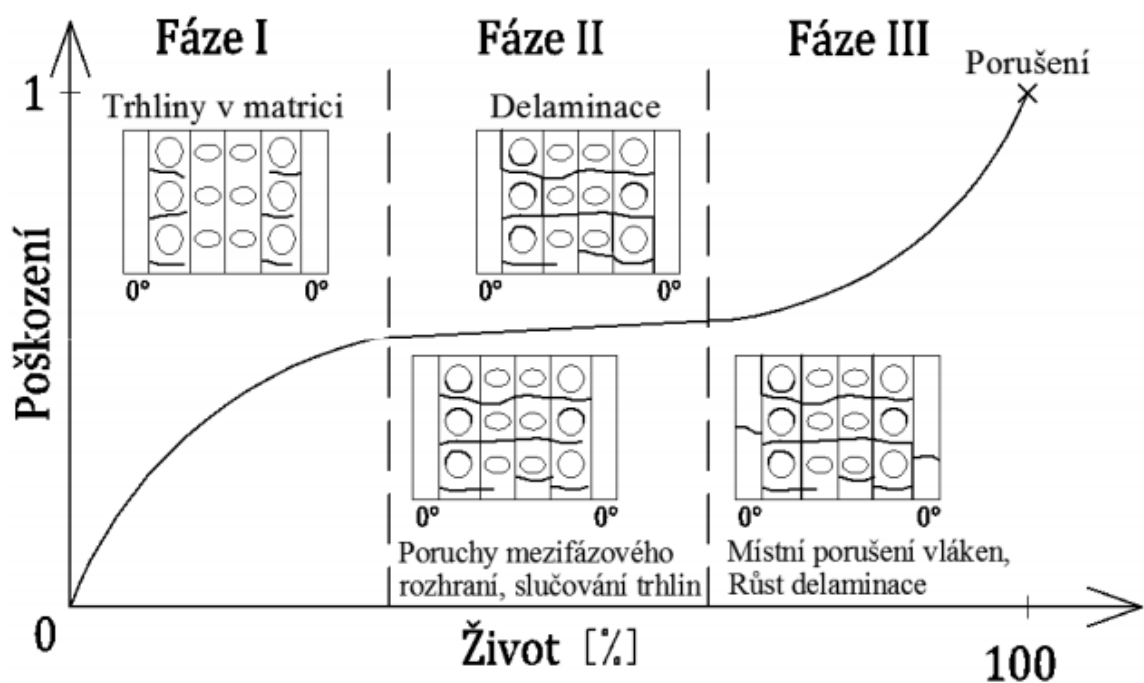
Při cyklickém namáhání vytvoří kovové materiály lokálně působící trhlinu, oproti tomu dochází u vláknových kompozitních materiálů ke vzniku trhlin různých typů a rozvoju ve velkém objemu materiálu. Růst těchto trhlin je zpravidla zastaven vedlejší houževnatější složkou materiálu.[1],[27]



Obrázek č. 24 Tvorba poškození kompozitních materiálů[1]

Rozdělení typů poškození vyskytujících se u vlákní vyztužených kompozitních materiálů:

- porušení kontinuity vláken s matricí
- vady a trhliny v matrici
- narušení vláken
- delaminace (porušení soudržnosti vrstev při postupujícím procesu únavy)[1]

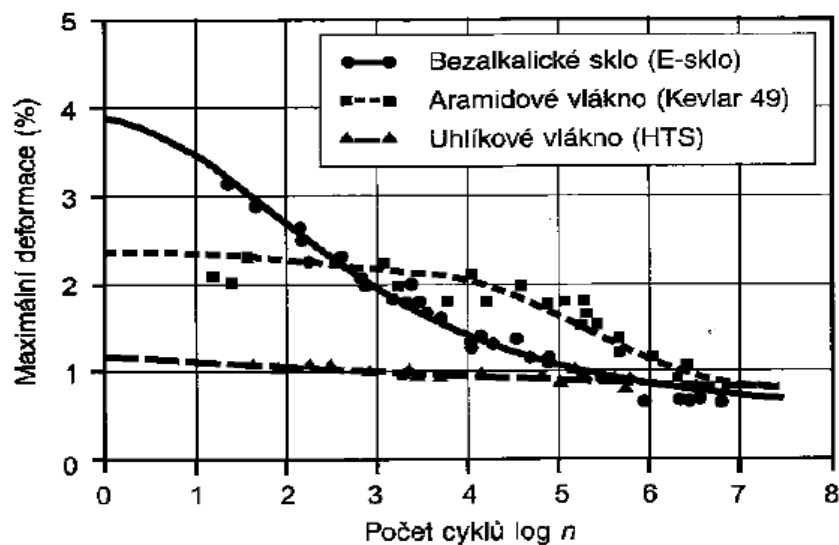


Obrázek č. 25 Rozvoj módů poškození během průběhu zkušebního života kompozitního tělesa [1]

Velikost a časový sled jednotlivých druhů poškození závisí především na vlastnostech všech složek kompozitního materiálu, jako je obsah a typ vlákna, tažnost matrice a orientace vláken. Druh poškození závisí také na rázu a směru napětí. Toto napětí může být například ve formě tahu, tlaku nebo smyku.

Při analýze procesu únavového poškození se poruchy dělí na **mikroskopické** a **makroskopické**. Mikroskopie se zabývá analýzou velikosti jednoho, či několika průměrů vláken, zatímco makroskopie se zabývá nejméně tloušťkou celé jedné vrstvy.

Porušení je samo o sobě kontinuální proces a obor zabývající se jeho analýzou, který je nazýván **mechanikou poškození**. Proces porušování začíná na mikroúrovni a s rostoucím počtem zatěžovacích cyklů vznikají stále rostoucí třidimenzionální oblasti poškození, což se projevuje snížením tuhosti materiálu, popřípadě konstrukčního prvku. Když rozsah poškození v určitém bodě dosáhne kritické hodnoty, klesne zbytková pevnost nebo tuhost pod úroveň působícího namáhání a dochází k lomu, nebo ke ztrátě stability.[1],[27]



Obrázek č. 26 Únavové vlastnosti kompozitu se stejnou epoxidovou pryskyřicí a různými druhy vláken [1]

K popsání únavového poškození existují tato kritéria:

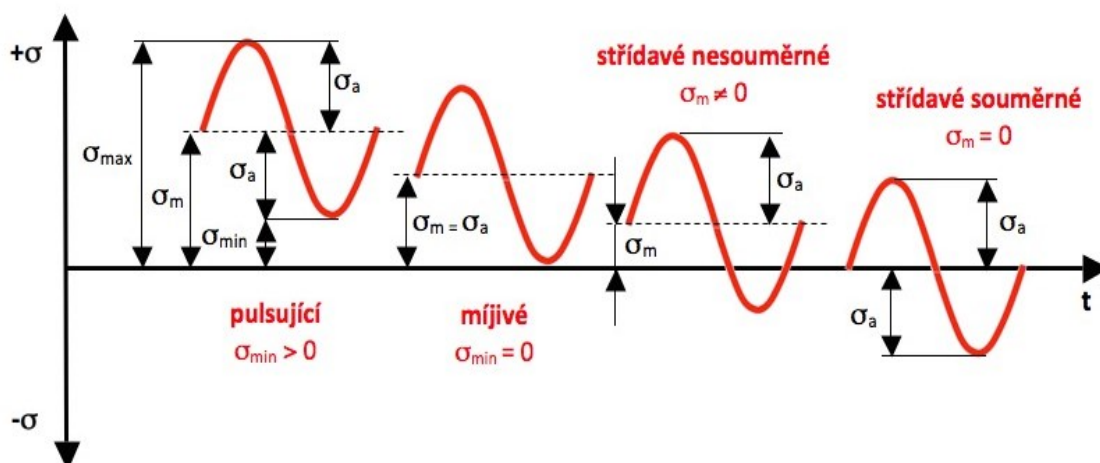
- lom nebo úplná porucha (Wöhlerova křivka)
- úbytek tuhosti a zbytková pevnost
- způsob poškození a jeho průběh

Tato kritéria umožňují prohlubovat poznatky o příčinách procesu **únavového poškození**, vyžadují však větší rozsah zkoušek při kontinuálním záznamu průběhu závislosti napětí – deformace a doplňují ultrazvukové zkoušky a mikroskopickou analýzu stavu poškození.

Přibližně se metody vyšetřování dynamických zatížení dělí na :

- **kontinuální** – proces poškozování je průběžně zaznamenáván
- **diskontinuální** – zkušební vzorek je zatěžován až do lomu nebo až do dosažení určitého zvoleného počtu zatěžovacích cyklů a následně je vyšetřován mikroskopickou nebo jinou nedestructivní metodou

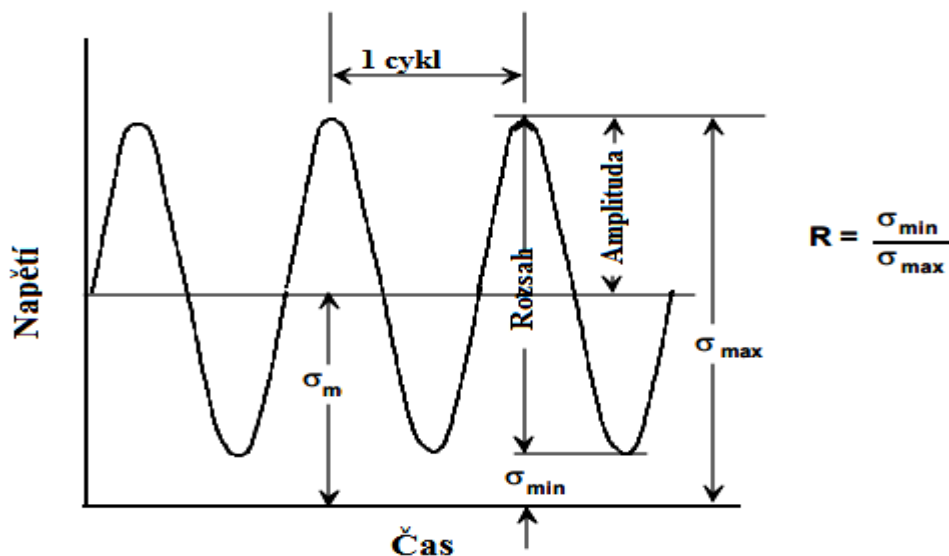
Dynamické zkoušky se provádějí při různých úrovních a typech namáhání. Při cyklickém zatěžování se jako charakteristika úrovně namáhání se užívá **poměr dolního napětí k hornímu** (R). Je-li dolní napětí tlakové a horní napětí a horní napětí tahové, pak je hodnota R záporná. [1]



Obrázek č. 27 Úrovně a typy namáhání při dynamických zkouškách[28]

2.2 Únavové zkoušky kompozitních materiálů

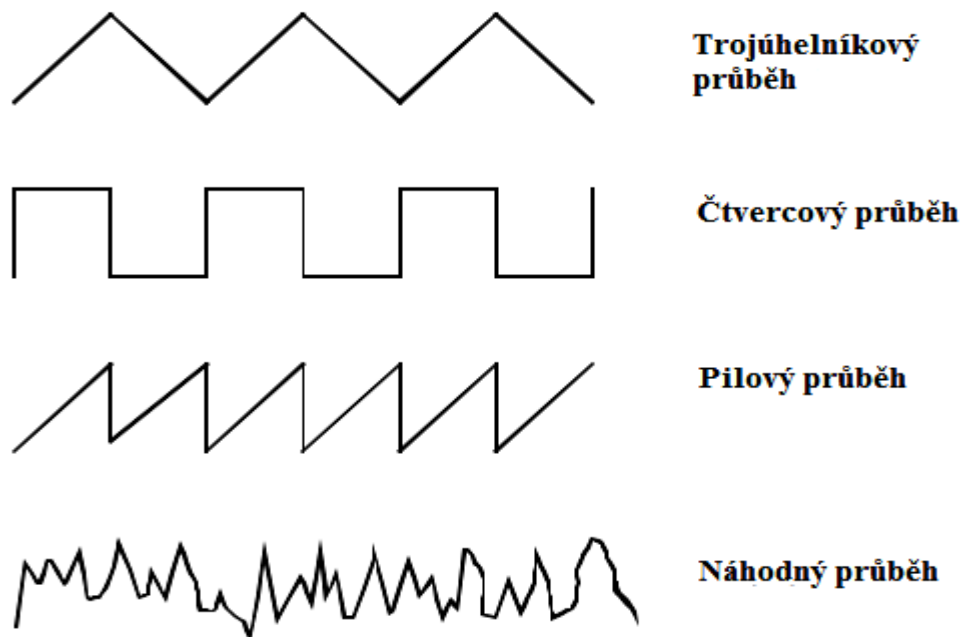
Testování únavových vlastností se obvykle provádí za použití sinusového zatížení. Stav únavového napětí lze popsat několika parametry, jako jsou maximální σ_{max} a minimální σ_{min} zatížení, rozsah napětí, amplituda napětí σ_a , střední napětí σ_m nebo poměr únavového napětí R . [29]



Obrázek č. 28 Sinusové zatížení při únavové zkoušce materiálu [29]

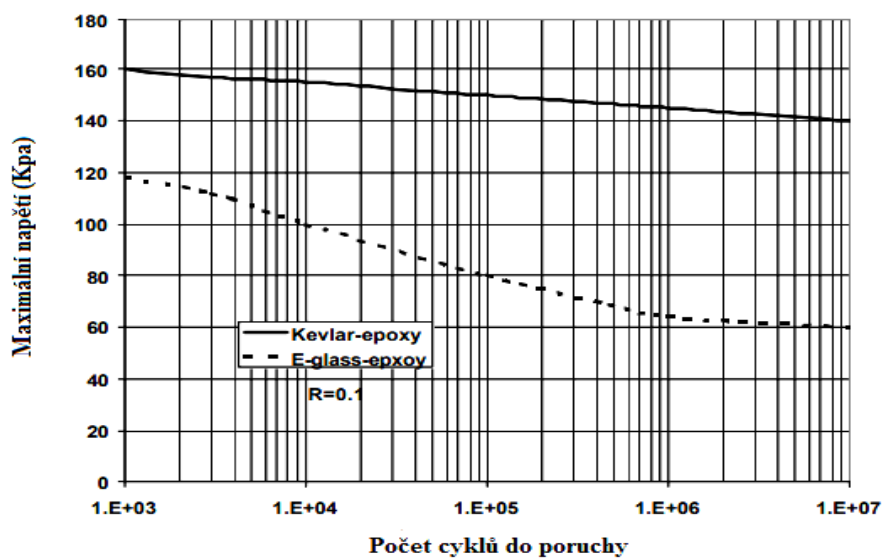
2.2.1 Průběhy napětí a frekvence

Přestože je sinusové zatížení nejpoužívanější, v praxi se setkáváme také s dalšími průběhy zatížení, které mohou ovlivňovat únavovou životnost materiálů. Mezi ně patří například trojúhelníkové, čtvercové, pilové a náhodné průběhy zatížení. Stroje pro zkoušení únavových vlastností kompozitů jsou schopny přenášet vysoké frekvence zatěžování, obvykle se ale při provádění zkoušky používá frekvence okolo 3 -10 Hertzů, tak aby nedocházelo k zvýšení teploty testovacího vzorku. Všechny typy zkoušek, jak pro různé typy zatížení, nebo různé deformační rychlosti probíhají při konstantní frekvenci. [29]



Obrázek č. 29 Možné průběhy zatížení při únavových zkouškách[29]

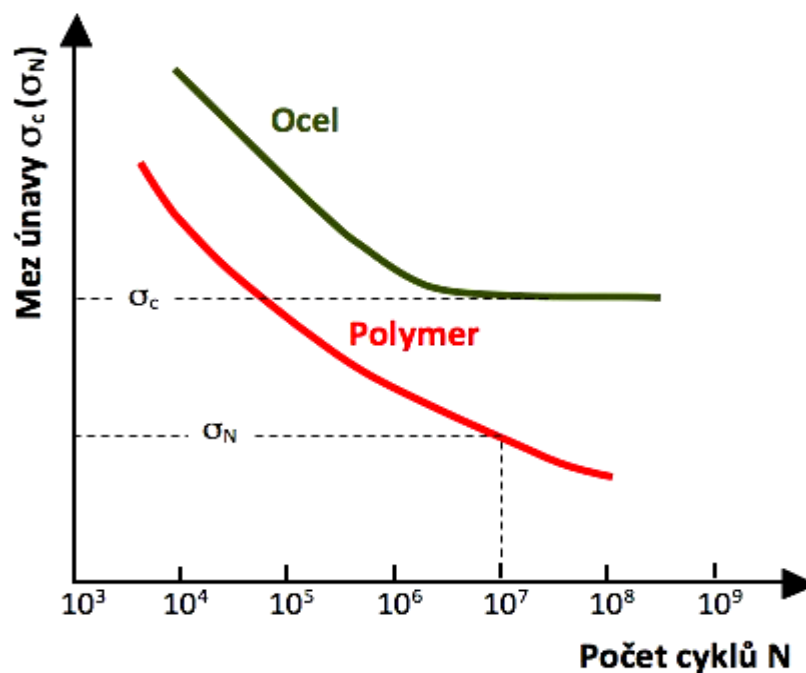
Únavová výdrž je často určována pomocí počtu cyklů, které je schopen materiál snášet až do okamžiku kdy je napětí maximální a dojde k porušení. Úplný popis únavového chování vyžaduje údaj o průměrném napětí, nebo poměr únavového namáhání R . Výsledky těchto testů jsou vyneseny do grafu jako poměr maximální únavy a počty cyklů až do porušení.



Obrázek č. 30 Únavová křivka Kevlaru a skelných vláken s epoxidovou pryskyřicí[29]

2.3 Wöhlerova křivka

K popisu únavového chování kompozitních materiálů vyztuženými vlákny je nejčastěji používána **Wöhlerova křivka**. Kritérium únavy je lom, to je úplné porušení zkušební vzorku. Vyhodnocování výsledků zkoušek statickými postupy dovoluje poměrně dobře hodnotit vhodnost materiálů pro jejich využití v podmínkách únavového namáhání.[1]



Obrázek č. 31 Srovnání obecné Wöhlerovi křivky pro ocel a pro polymer[28]

Pro dynamicky zatížené části je lom, pokud se zřetelně objeví, jako jediné kritérium únavy nedostatečný, neboť většina vláknů vyztužených kompozitních materiálů s rostoucí dobou zatížení a postupující únavou více nebo méně vykazuje pokles tuhosti. Tento pokles je přípustný například při použití vláknů vyztužených kompozitních materiálů pro konstrukční prvky, kde se může změna vlastností s počtem cyklů měnit v určitých mezích. Vezmeme-li jako kritérium únavy určitý pokles tuhosti obvykle o 10 až 20 % a vyneseme-li tyto body do Wöhlerova diagramu, získáme další informace o časovém průběhu únavy. Ke stanovení zbytkové pevnosti je pak zkušební těleso po určitém počtu cyklů zatížení podrobena statické zkoušce.[1]

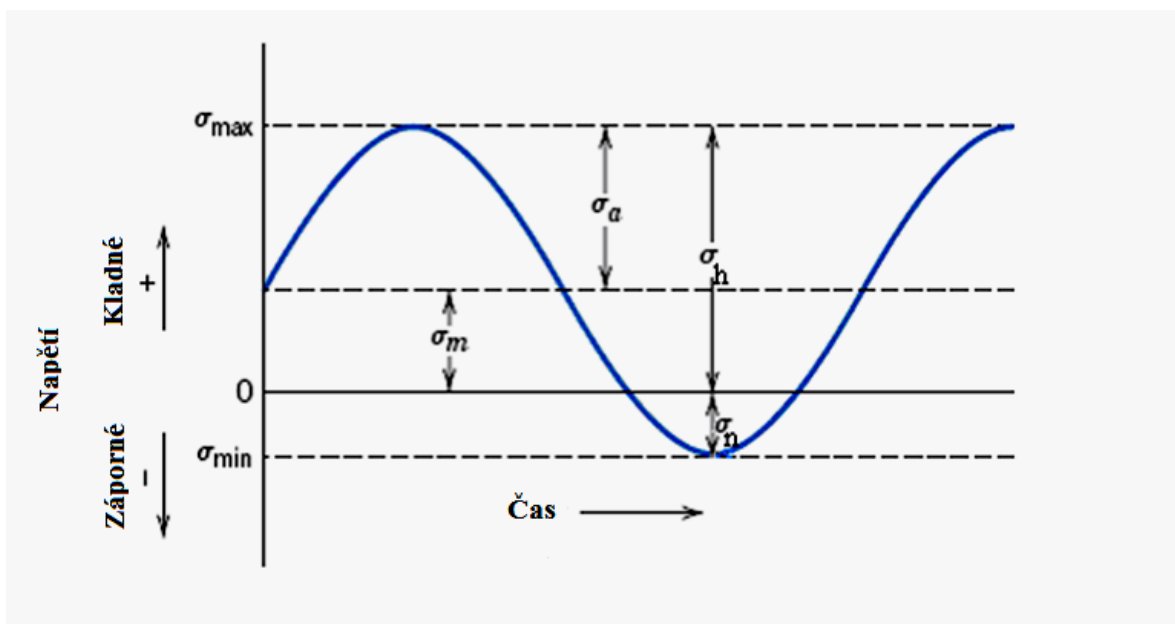
2.3.1 Popis cyklu Wöhlerovi křivky

Úplný popis únavového chování umožňuje poměr únavového napětí R :

$$R = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}}$$

- $R = 1$ statické zatížení
- $R =$ záporné číslo \Rightarrow střídavé napětí
- $R =$ kladné číslo \Rightarrow pulzující napětí [30]

Zatěžovací cyklus:

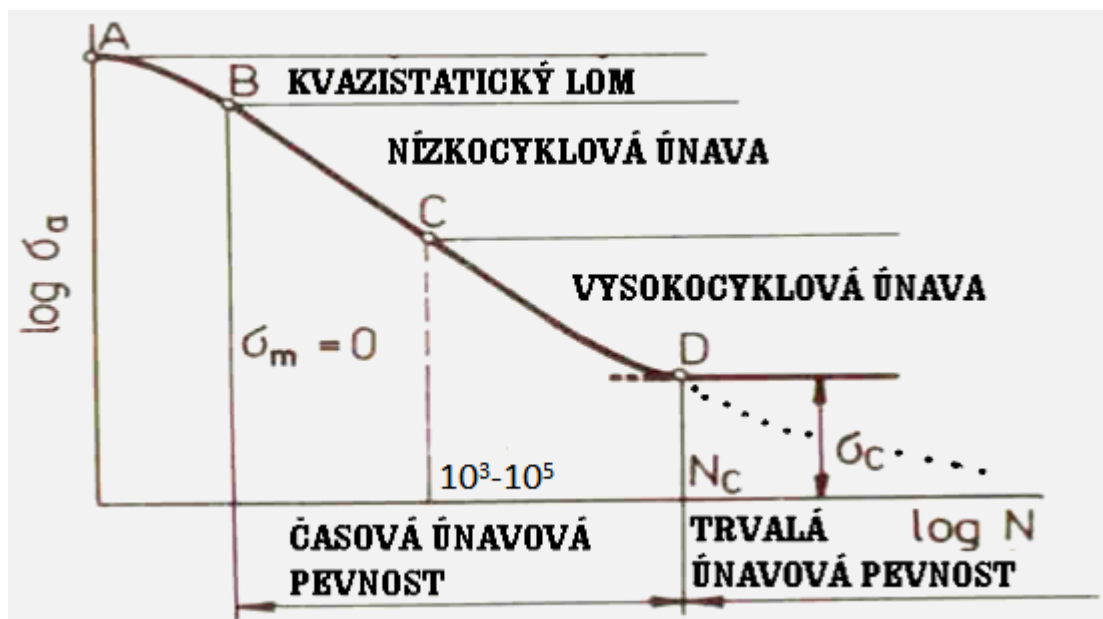


Obrázek č. 32 Charakteristiky opakovaného cyklického zatížení[30]

- σ_h = horní napětí
- σ_a = amplituda napětí
- σ_n = dolní napětí
- σ_h = horní napětí
- σ_m = střední napětí

Wöhlerova křivka se obvykle rozděluje na tyto oblasti:

- **Oblast kvazistatického lomu:** k lomu dochází už při několika desítkách cyklů
- **Oblast nízko cyklické únavy:** je charakterizována napětím vyšším, jako je mez kluzu Re
- **Oblast vysoko cyklické únavy:** je charakterizována napětím nižším, jako je mez kluzu Re [30]

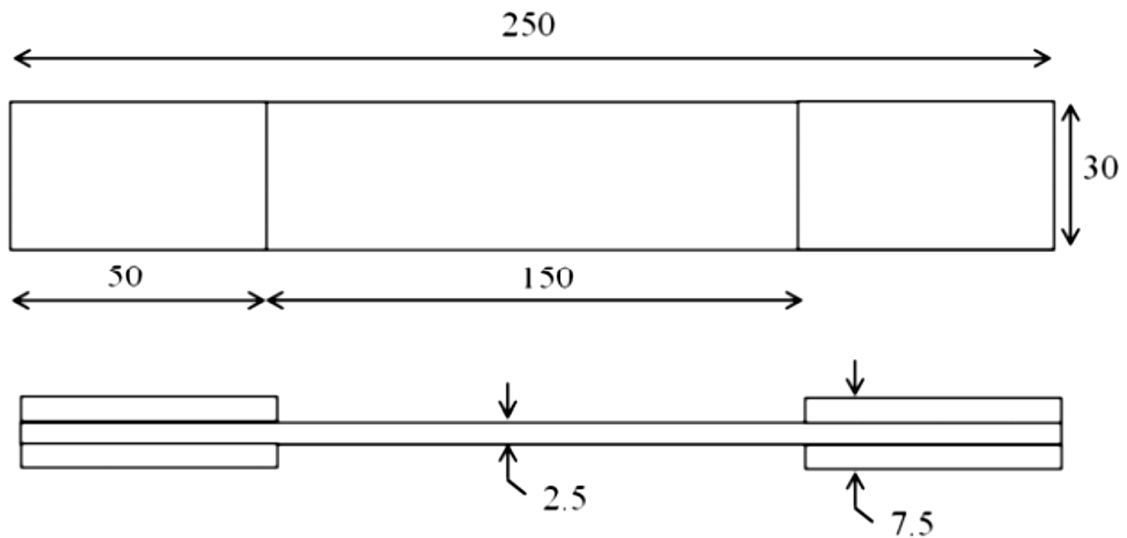


Obrázek č. 33 Oblasti Wöhlerovi křivky[30]

2.4 Normalizované metody únavových zkoušek

EN ISO 13003 - "Fibre Reinforced Plastics Composites - Determination of Fatigue Under Cyclic Loading Conditions" Polymerní kompozitní materiály vyztužené vlákny - stanovení únavového chování za podmínky cyklického zatížení.

Tato mezinárodní norma definuje obecné postupy pro zkoušení únavy kompozitních materiálů za podmínek cyklického zatížení, konstantní amplitudy a konstantní frekvence. Tyto obecné postupy jsou použitelné pro všechny způsoby testování a řízení testovacích strojů.[31]



Obrázek č. 34 Zkušební těleso zkoušky EN ISO 13003 [31]

ASTM D3479 - " Standard test method for tension-tension fatigue of polymer matrix composite materials" Normalizovaná metoda únavového chování pro tah-tah, kompozitních materiálů s polymerní matricí.

Tato zkušební metoda určuje únavové chování kompozitních materiálů z polymerní matrice podrobené tahovému cyklickému zatížení. Tato zkušební metoda představuje dva postupy, A a B, kde každý z nich definuje jiný kontrolní parametr testu napětí, nebo deformaci. U postupu A je hlavním parametrem napětí (zatížení) a stroj je řízen tak, že zkušební vzorek je vystaven opakujícímu se konstantnímu zatížení. U postupu B je hlavním parametrem deformace, stroj je řízen tak, aby byl zkušební vzorek vystaven opakujícím se deformačním cyklem.[32]

ASTM D6115 – " Standard test method for mode I fatigue delamination growth onset of unidirectional fibre reinforced polymer matrix composites"

Tato zkušební metoda slouží ke kvantitativnímu stanovení účinků po povrchové úpravě vláken, k určení lokálních změn objemové frakce a srovnává hodnoty G (*smykový modul*) a N (*normálové napětí*). Slouží také k vyvinutí kritéria pro zabránění náběhu růstu delaminace při únavovém zatížení a pro analýzu odolnosti kompozitního poškození a trvanlivosti.[32]

3 VLIV KLIMATICKÉHO PROSTŘEDÍ NA ÚNAVOVÉ VLASTNOSTI KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ

Kompozitní materiály jsou často vystaveny působením vnějšího prostředí. Kombinace odlišných atmosférických jevů, které se navzájem propojují a společným působením zapříčiňují degradaci mechanických a fyzikálních vlastností. Neznalost chování kompozitních materiálů v extrémním prostředí vede k nevyužití vlastností, využitelnost končí, jakmile tuhost způsobí konstrukční nestabilitu, nebo pokles pevnosti způsobí zhroucení celé konstrukce.[33]

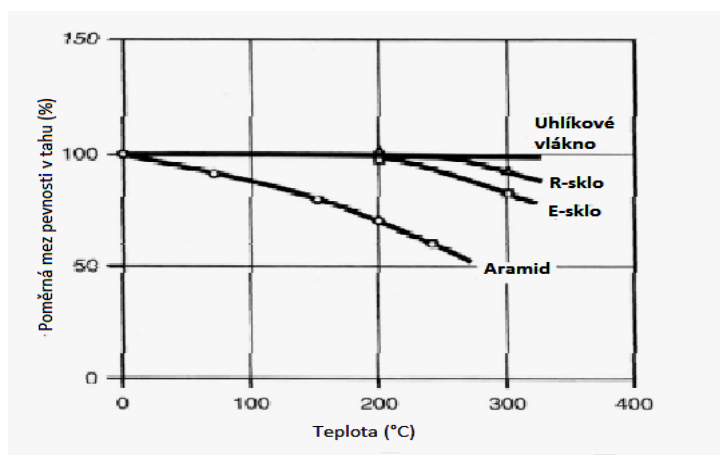
Typy degradace:

- ztráta adheze rozhraní vlákno/matrice
- ztráta pevnosti vláken korozí pod napětím
- chemické degradace matrice
- pokles modulu a pevnosti matrice na čase a teplotě
- urychlená degradace kombinací teploty a chemického prostředí [33]

3.1 Vliv prostředí na vlákna a matrici

3.1.1 Vliv prostředí na skelné vlákno

- zvýšená teplota a koroze pod napětím
- pevnost klesá s teplotou
- zpožděné porušení při statickém zatížení
- růst již existujících vad ve skle, v prostředí se tento jev urychluje



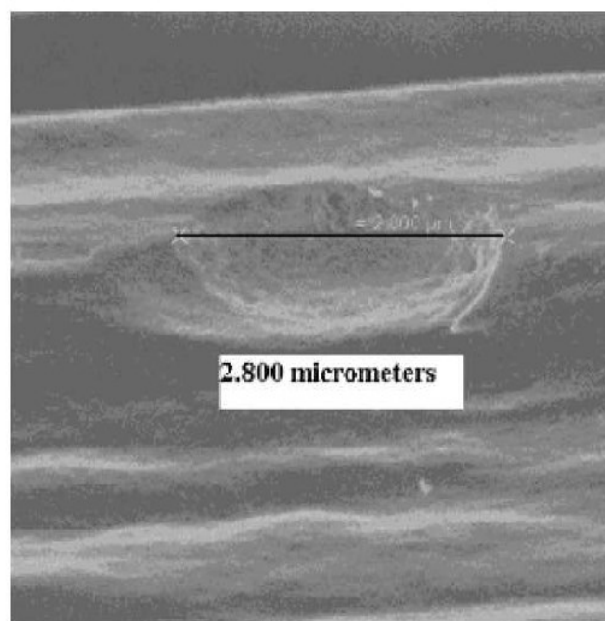
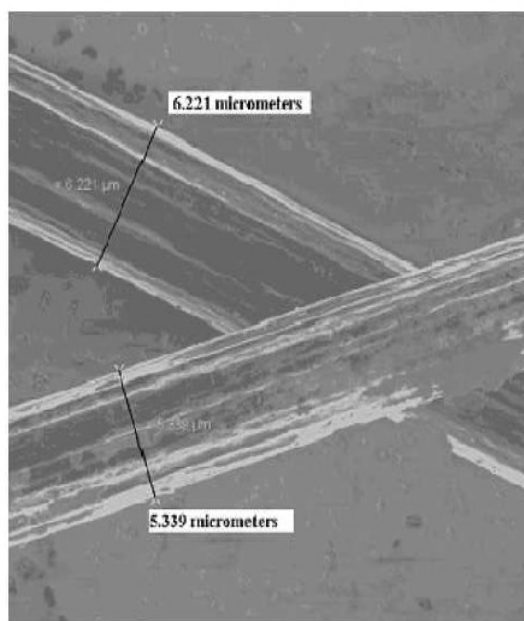
Obrázek č. 35 Vliv teploty na mez pevnosti v tahu u vybraných typů vláken[33]

3.1.2 Vliv prostředí na pevnost uhlíkového vlákna

- pevnost klesá s teplotou; výrazně až od 450°C
- důlky, které vznikají, snižují pevnost vlákna
- při teplotách běžných pro polymerní kompozitní materiál (do 170°C) je degradace uhlíkových vláken zanedbatelná[33]

Tabulka č. 7 Velikost vad v závislosti na času, teplotě a tlaku[33]

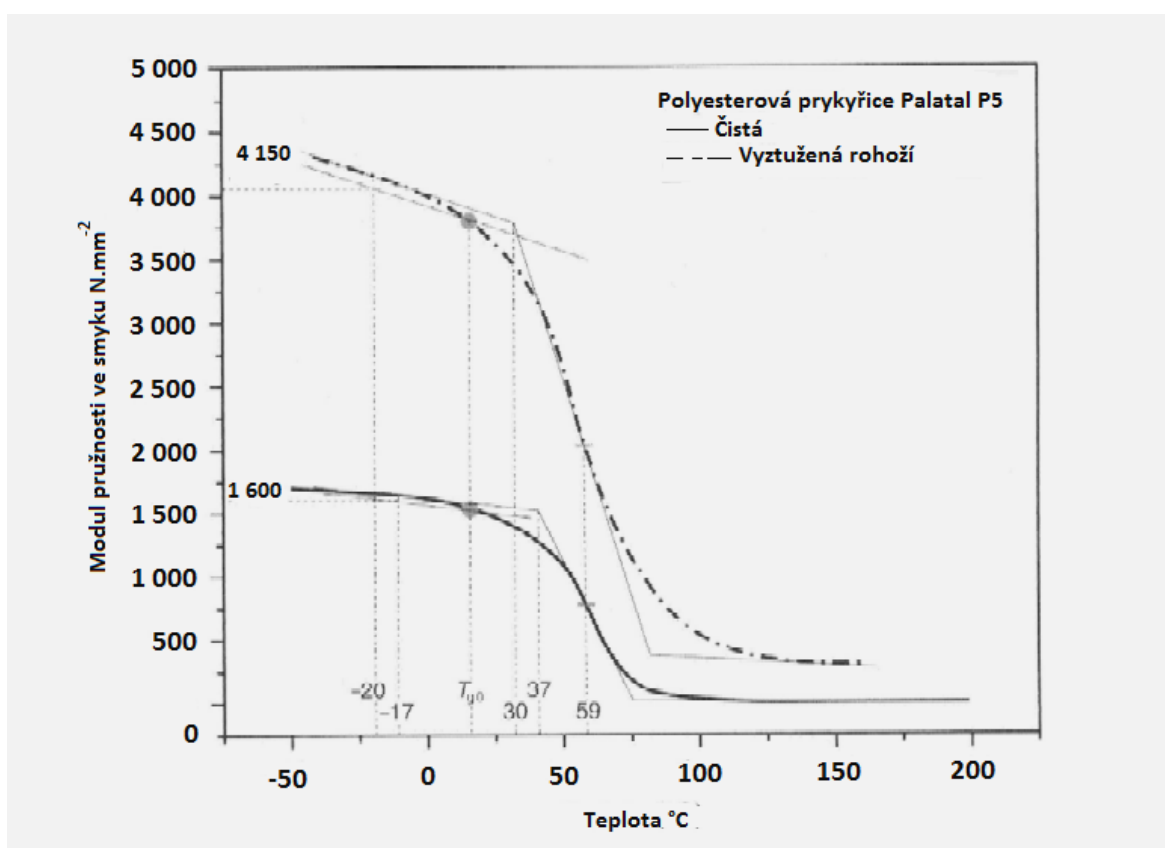
Čas [2h] / T [°C]	350 °C	450°C	600 °C
Velikost vad [nm]	29	43	500
Tlak [Mpa]	5200	4270	1253



Obrázek č. 36 Redukce průřezu a pitting při vystavení 600°C po dobu 2 hodin[33]

3.1.3 Pevnost a tuhost matrice v závislosti na teplotě

- modul a pevnost výrazně klesá s teplotou při přiblížení k T_g
- rozklad matrice vede k poklesu tuhosti a pevnosti
- nad určitou teplotu se při návratu na pokojovou teplotu model nezachová – trvalé změny
- při dlouhém nebo výrazném působení vysokých teplot dojde k odpaření matrice



Obrázek č. 37 Závislost modulu pružnosti ve smyku na teplotě u polyesterové prykyřice[33]

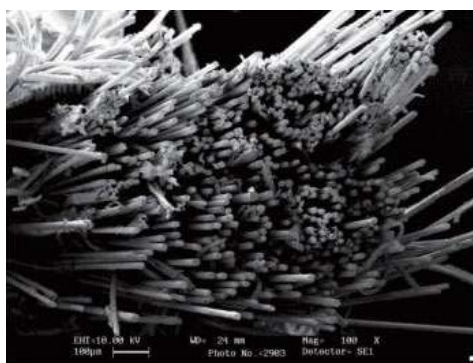
3.2 Vliv vlhkosti a teploty na kompozitní materiál

Vliv zvýšené vlhkosti na porušování:

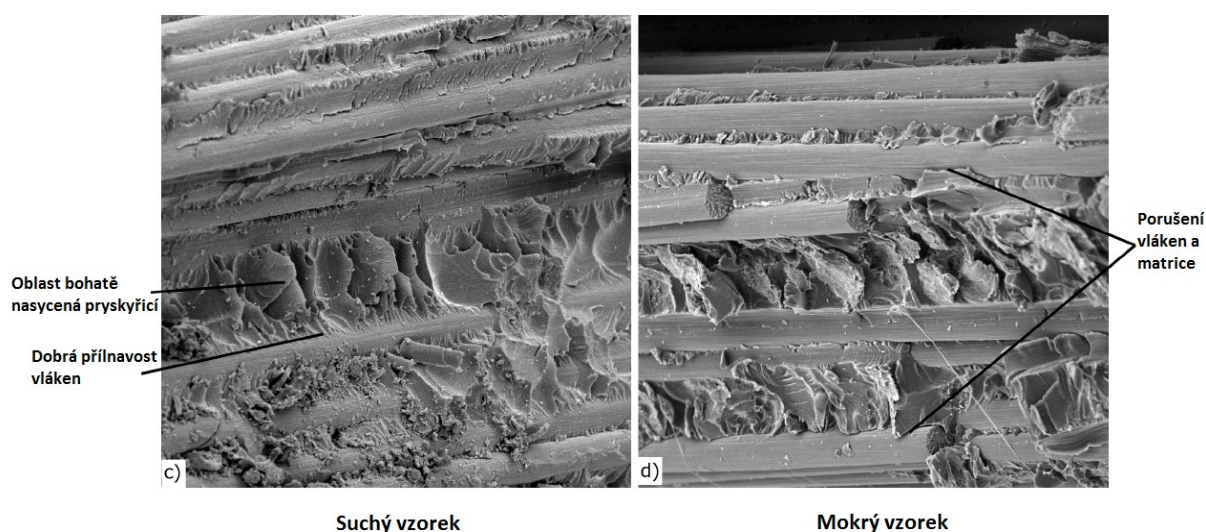
- plastizace matrice
- oslabení rozhraní vlákna s matricí

3.2.1 Vliv vlhkosti na odolnost proti tahu

- před lomem převažuje dělení vláken a tím dochází k oslabenému rozhraní
- vzniká lom typu košťete



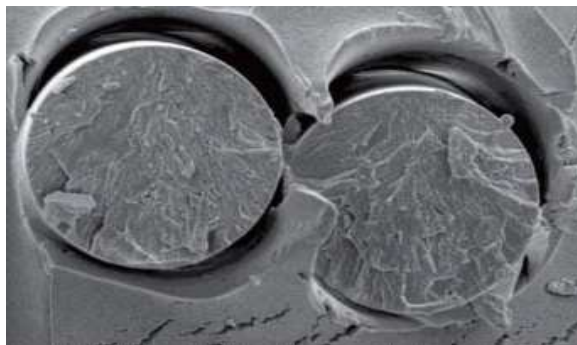
Obrázek č. 38 Vzhled lomu při tahové zkoušce po vystavení vzorku vlhkému prostředí[33]



Obrázek č. 39 Srovnání suchého a mokrého vzorku při porušení [33]

3.2.2 Vliv teploty na kompozitní materiál

- teplota je často **závažnější než vlhkost**
- vysoká teplota má vliv na lom až v blízkosti teploty T_g
- nízká teplota způsobuje pnutí v důsledku záporné teplotní podélné roztažnosti vláken: vlákno se roztahuje, matrice smršťuje – vzniká pnutí na rozhraní
- **degradace rozhraní vlákno/matrice** [33]

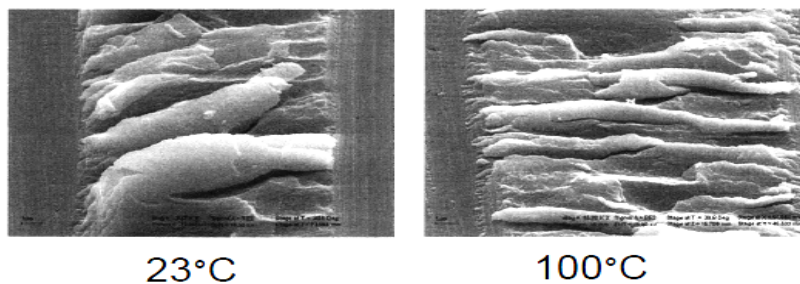


Obrázek č. 40 Porušení rozhraní vlákno/matrice [33]

3.2.3 Vliv teploty na mechanické vlastnosti kompozitu

Vysoká teplota:

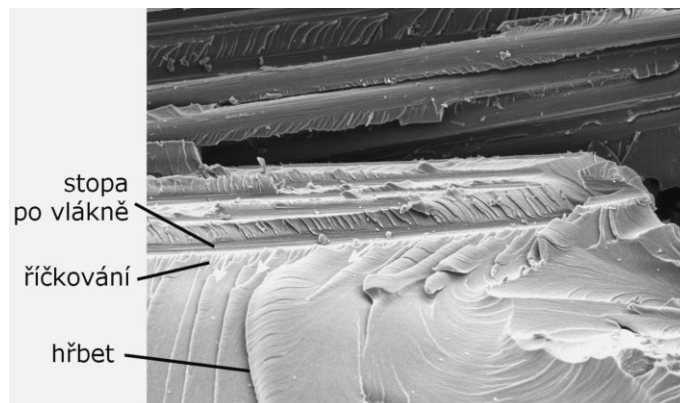
- **Tah:** dělení svazků vláken
- **Tlak:** významný vliv teploty, snížená odolnost proti delaminacím, dochází k dělení vláken, k porušení ve vzpěru dochází dříve
- **Ohyb:** snížená pevnost vede k častější delaminaci ve střední vrstvě namáhané smykem
- **Únava:** oslabení rozhraní je kritické, **snížení lomové houževnatosti, degradace rozhraní vlákna a matrice**



Obrázek č. 41 Snížená pevnost kompozitu na rozhraní v závislosti na teplotě [33]

Nízká teplota:

- zvyšuje křehkost – klesá houževnatost mezilaminárních porušení
- zřetelné říčkování – zlepšuje čitelnost porušení



Obrázek č. 42 Zřetelné říčkování při porušení kompozitního materiálu v závislosti na nízké teplotě [33]

Vliv prostředí na lom:

Obrázek č. 43 Rozdílné typy lomů kompozitu v závislosti na teplotě[33]

4 KOMPOZITNÍ MATERIÁLY VYZTUŽENÉ UHLÍKOVÝMI VLÁKNY

Uhlík je vysoce výkonný vláknitý materiál, který je nejčastěji používanou výztuží v pokročilých kompozitních materiálech s polymerní maticí. Důvodů pro tak časté využití uhlíkových vláken je několik:

- ze všech vláknitých materiálů, které se používají pro vyztužování, mají uhlíkové vlákna nejvyšší modul pružnosti a nejvyšší specifickou únosnou sílu
- při zvýšených teplotách si zachovávají vysoký modul pružnosti a vysokou pevnost
- při pokojové teplotě nejsou uhlíková vlákna ovlivněna vlhkostí, nebo širokým spektrem rozpouštědel, kyselin a zásad
- uhlíkové vlákna vykazují rozmanitost fyzikálních a mechanických vlastností, což umožňuje mít kompozitům, které tyto vlákna obsahují specifickou konstrukci a vlastnosti
- procesy výroby kompozitů vyztuženými uhlíkovými vlákny jsou relativně levné a nákladově efektivní [34]



Obrázek č. 44 Využití kompozitů s uhlíkovými vlákny [35]

4.1 Únavové vlastnosti kompozitů s uhlíkovými vlákny

Uhlíkové lamináty jsou charakterizovány vynikající odolností proti únavě. Nejlepší spojení z hlediska pevnosti a odolnosti pro využití těchto materiálů je **epoxidová matrice a uhlíkové vlákno**. Uhlíkové kompozity vyztužené epoxidovou maticí jsou velmi dobrý materiál pro cyklické a proměnlivé napětí. Statická mez únavy v míjivém tahu, dosahuje u těchto materiálů asi 70 % statické pevnosti v tahu. V míjivém tahu/tlaku je to asi 35% statické pevnosti tahu. Vzhledem k tomu, že tyto kompozity mají také velmi dobrý poměr pevnosti a tuhosti k vlastní hmotnosti, je jejich využití všestranné například v leteckém a automobilovém průmyslu.

Výhodou je vysoká únavová pevnost v závislosti na statické pevnosti a její pozvolný pokles s počtem cyklů až do porušení materiálu. Vyznačují se také vysokou zbytkovou pevností a malým poklesem tuhosti s počtem kmitů zatížení. Správným pokládáním vrstev lze dosáhnout požadovaných hodnot pevnosti a tuhosti pro specifické využití tohoto materiálu.

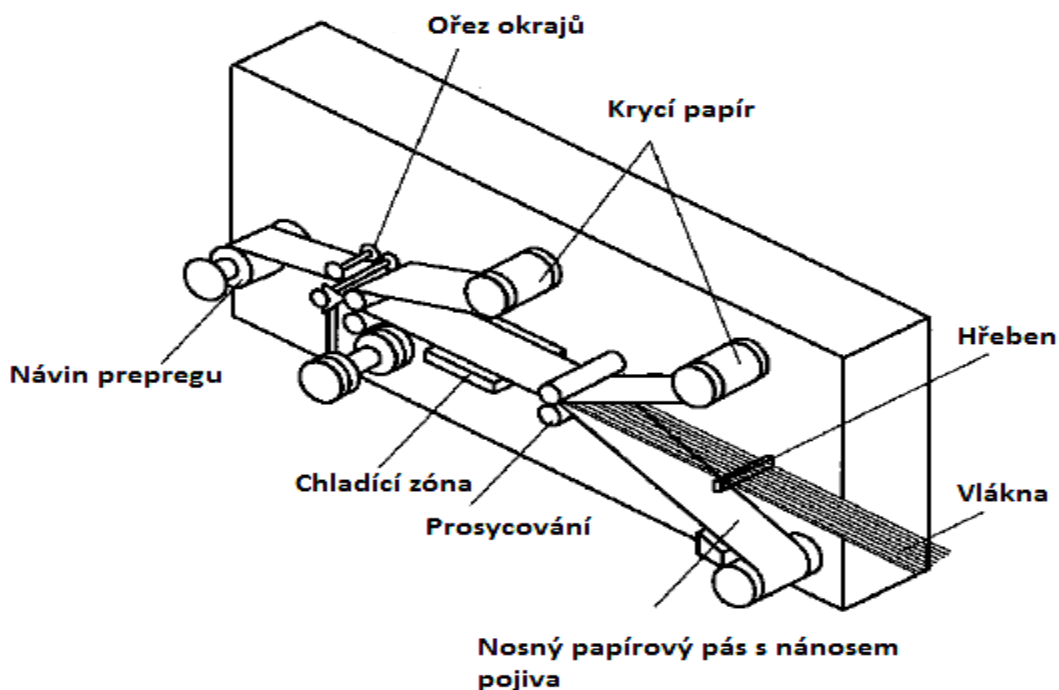
Nevýhody zahrnují sníženou odolnost vůči tlakovému zatížení, nárazu a korozní citlivost při styku se slitinami hliníku (*Al*) a oceli. Další nevýhodou může být absorpce vlhkosti a s tím zapříčiněný pokles tuhosti a mechanických vlastností. Tyto nevýhody lze odstranit vhodným provedením konstrukce.[1],[28]



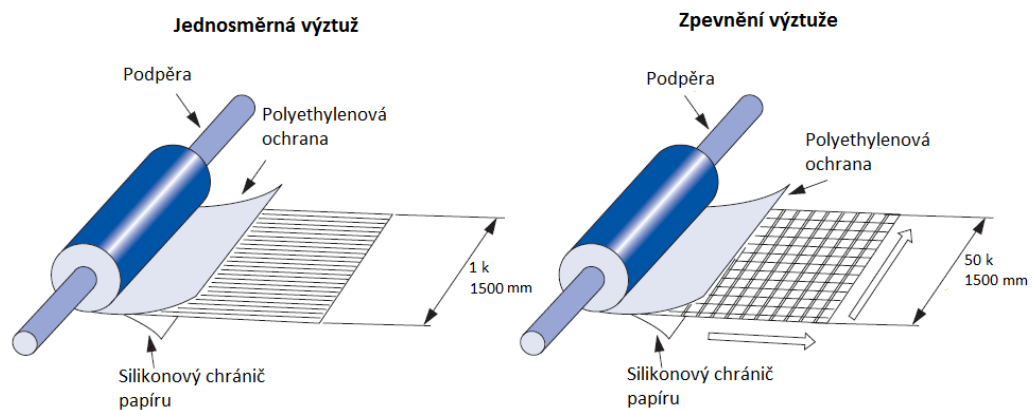
Obrázek č. 45 Únavové křivky vybraných kompozitních materiálů [1]

5 TECHNOLOGIE PREPREG

Prepreg je termín kompozitního průmyslu pro předem impregnovanou vláknitou výztuž s polymerní pryskyřicí, která je pouze částečně vyztužena. Použití prepregů má tu výhodu, že je oddělen složitý proces prosycování výztuže pojivem od dalšího zpracování. Tento postup, který má velký vliv na kvalitu a vlastnosti budoucího výrobku, se provádí za kontrolovaných podmínek na speciálním zařízení. Při výrobě jednosměrně vyztuženého prepregu se odvíjejí pramence vláken ze stojanu s cívkami a vedou se rovnoběžně vyrovnány v rovině přes stavitelný hřeben. Takto připravený pás vláken se ukládá na papírový nosič opatřený silikonovou vrstvou, na který byla předem nanesena vrstva pryskyřice. Pás je veden na vytápěný válec kalandru, kde pod tlakem dochází k prosycení výztuže pojivem. Pás prepregu, prosycený pryskyřicí a oboustranně chráněný nosným papírovým pásem, prochází chladicí zónou, kde se zastaví vytvrzovací reakce. Prepregy vyrobené na takovém zařízení se mají všechna vlákna uložena rovnoběžně a nazývají se jednosměrné prepregy. Kromě těchto se vyrábí celá škála dalších typů z tkanin a rohoží. [1]

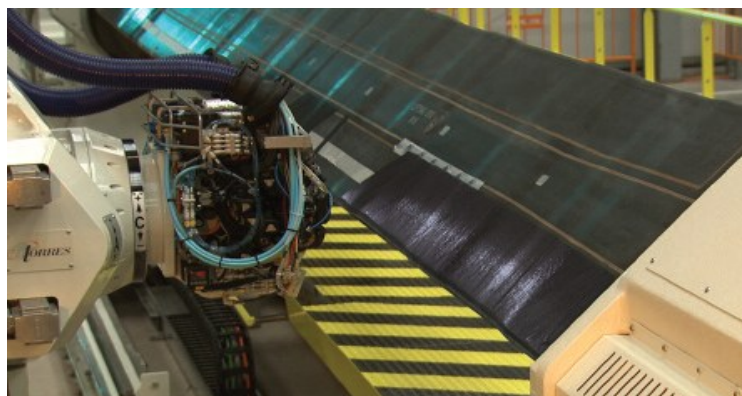


Obrázek č. 46 Výroba prepregů [1]



Obrázek č. 47 Varianty výztuže u výroby prepregů [19]

Prepregy s reaktivním termosetickým pojivem se musí až do doby dalšího zpracování skladovat za chladu asi -20°C . V závislosti na reaktivitě použitého pojiva jsou prepregy skladovatelné nejvýše 6 měsíců. Přibližně 6 hodin před vlastním zpracováním se prepreg rozmrazí bez přístupu vzduchu, tak aby nedošlo ke srážení vzdušné vlhkosti na povrchu prepregu. Poté se připraví podle stříhového a pokládacího plánu potřebné přířezy pro laminaci. Fixace polohy přířezů se provádí slabým přitlačením ručním válečkem nebo teflonovou stěrkou. Na povrch se výrobku se přiloží pružná a separační fólie a výrobek se vytvrdí v autoklávu, nebo metodou lisování ve vyhřívané formě. Sériová výroba konstrukčních prvků jako například v leteckém průmyslu je částečně automatizována. Prepregový pás je ukládán pomocí NC zařízení, výroba je tak ekonomická a reprodukovatelná.[1]



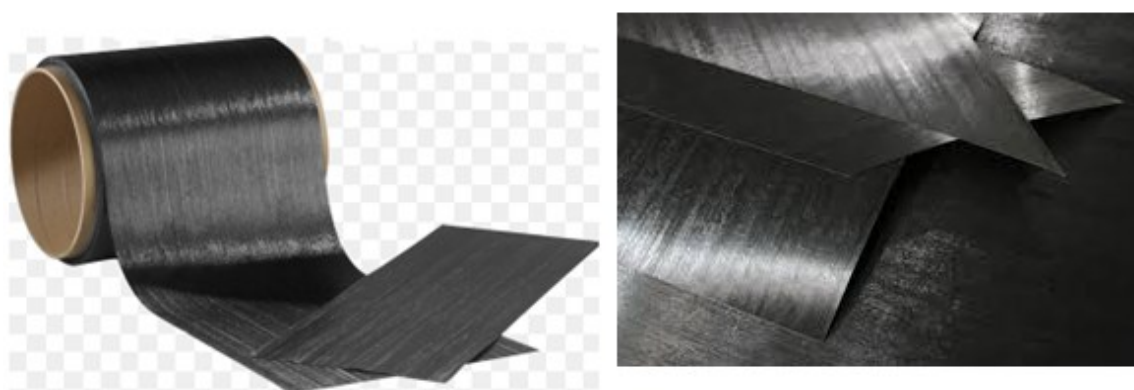
Obrázek č. 48 Sériová výroba prepregů [19]

5.1.1 UD Prepregy

UD prepregy jsou lehké a výjimečně odolné pásy z jednosměrné tkaniny, které se používají například k vytvoření struktury v letadlech, raketových vozidlech, družicích a závodních vozidel F1.[19]

Výhody UD prepregu:

- vysoká pevnost a tuhost v jednom směru
- nízká hmotnost vlákna ($100 \text{ g} / \text{m}^2$)



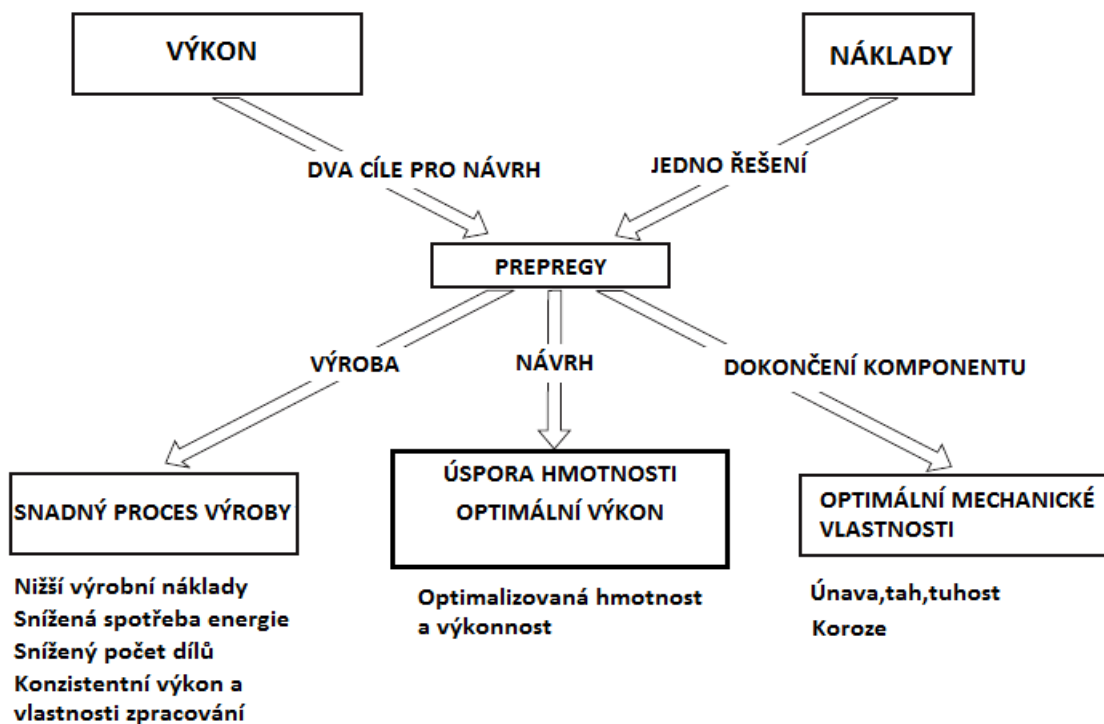
Obrázek č. 49 UD prepreg [36]

5.2 Použití prepregů

Materiály skládající se z prepregů mají široké spektrum využití ve všech průmyslových odvětvích. Je to zejména díky jejich vynikajícím mechanickým vlastnostem jako například výborná tuhost a pevnost, stejně jako dobré tepelné, chemické a elektrické vlastnosti, to všechno nabízí při výrazné úspoře hmotnosti oproti kovům.

Hlavní využití najdeme v leteckém a kosmickém průmyslu, kde se používají v civilních letadlech, na primární konstrukci, v interiérech a u konstrukce motorů. Další využití je například v energetickém průmyslu, v dopravě a u nástrojů.

Dvě hlavní kritéria ovlivňující výběr prepregů pro konkrétní aplikaci jsou **výkon** a **náklady**. [19]

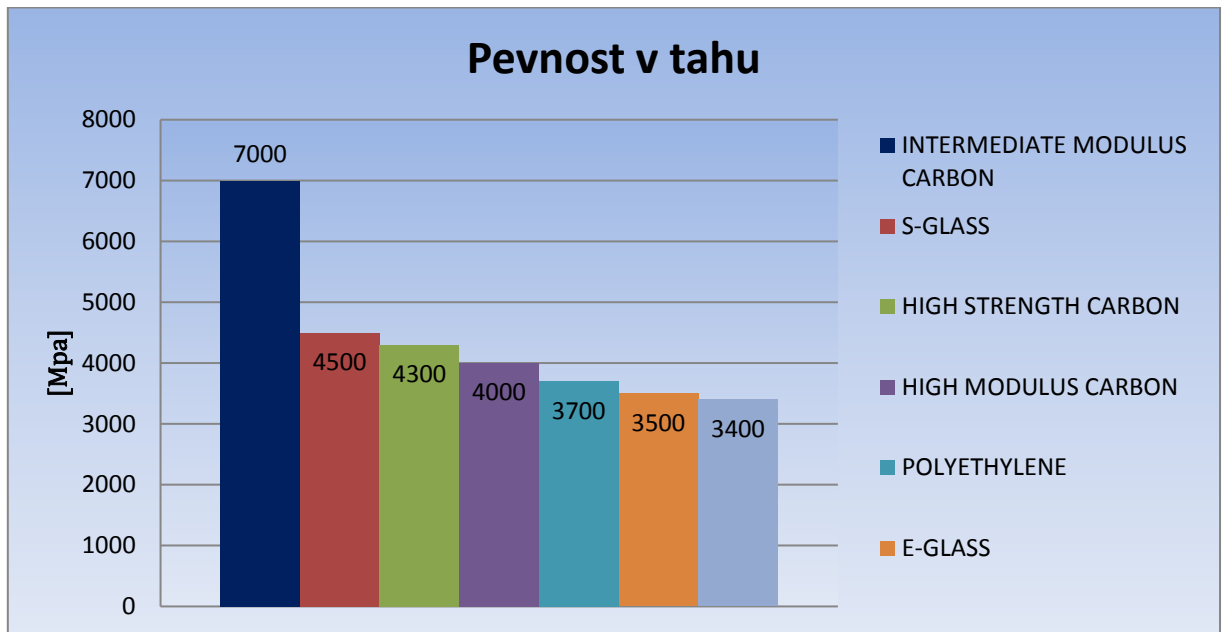


Obrázek č. 50 Kritéria ovlivňující výběr prepregů [19]

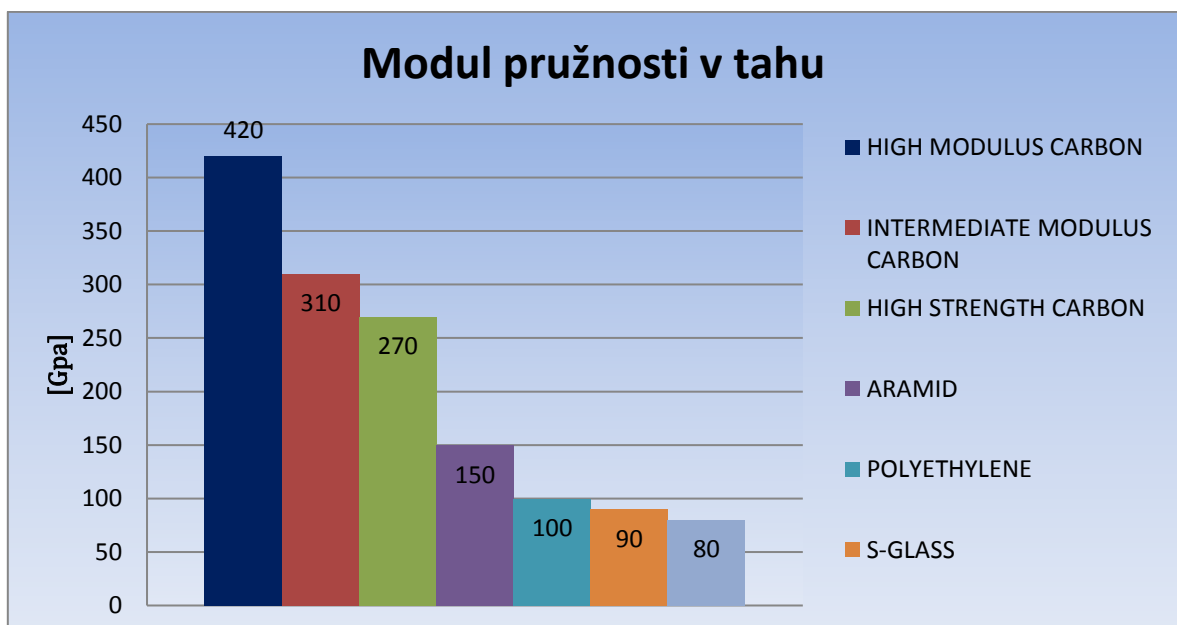


Obrázek č. 51 Příklady využití prepregů [19]

5.2.1 Porovnání základních mechanických vlastností vláken použitých při výrobě prepregů:



Obrázek č. 52 Pevnost v tahu vybraných vláken používaných při výrobě prepregů [1]



Obrázek č. 53 Modul pružnosti v tahu vybraných vláken používaných při výrobě prepregů

[1]

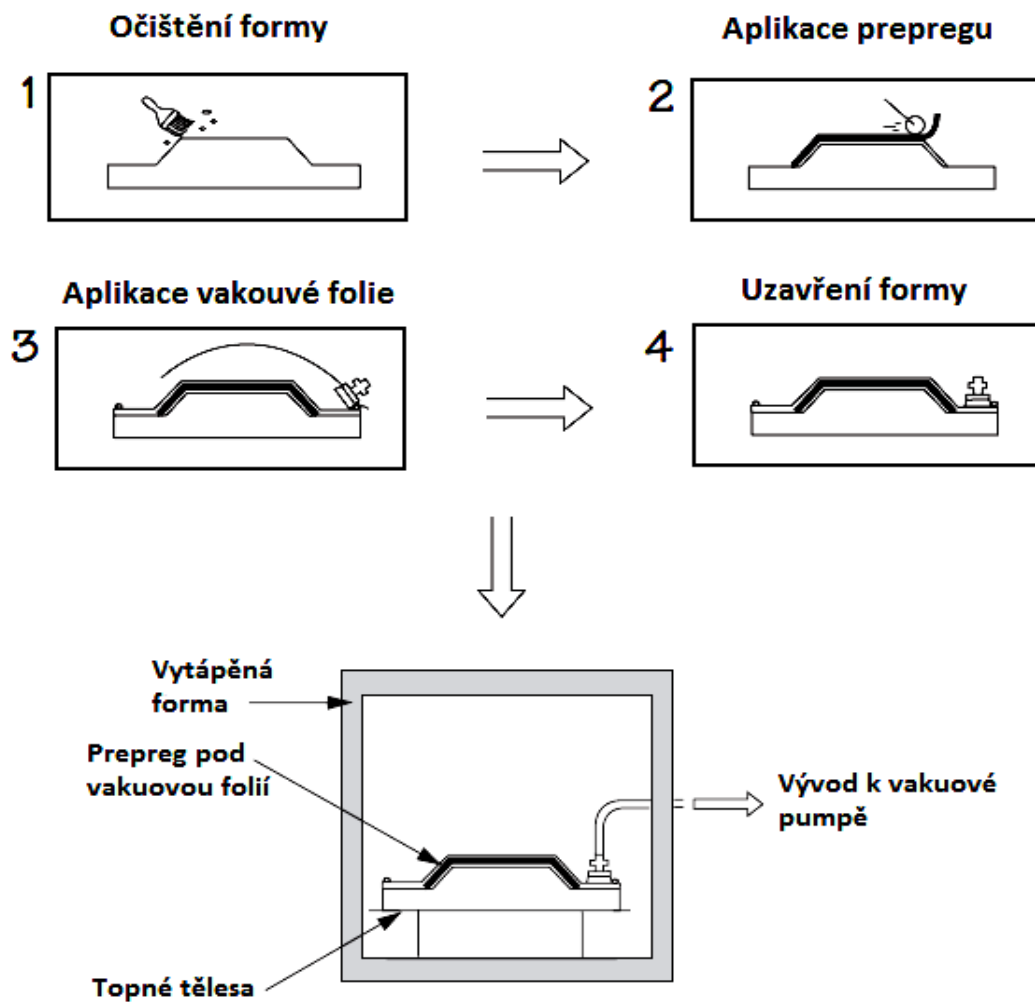
II. PRAKTICKÁ ČÁST

6.1.1 Podmínky vytvrzování UD Deltapreg VV430U 34%

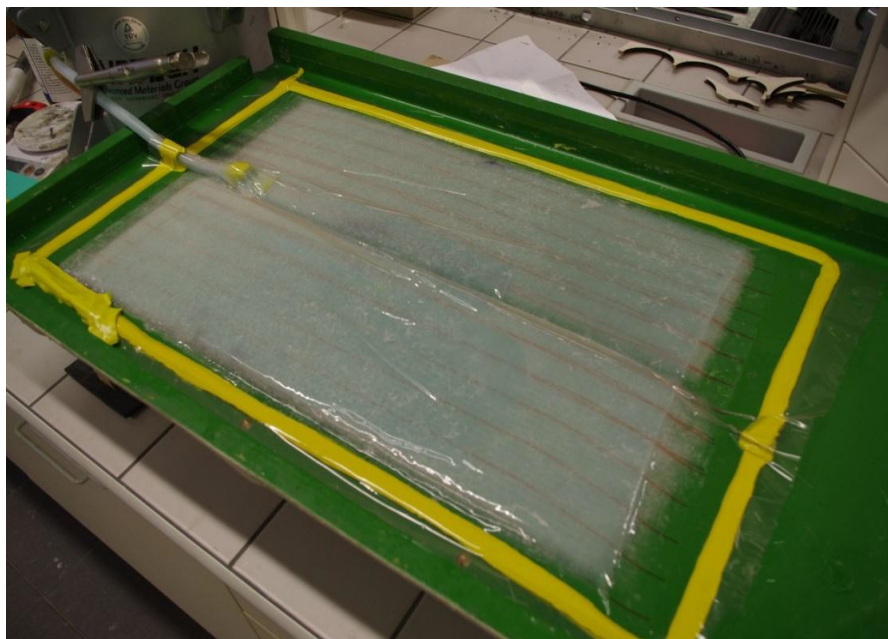
Teplota vytvrzování	90°C
Čas vytvrzování	180 min

6.1.2 Podmínky vytvrzování UD Carbon IMP GV 420U

Teplota vytvrzování	110°C
Čas vytvrzování	26 min

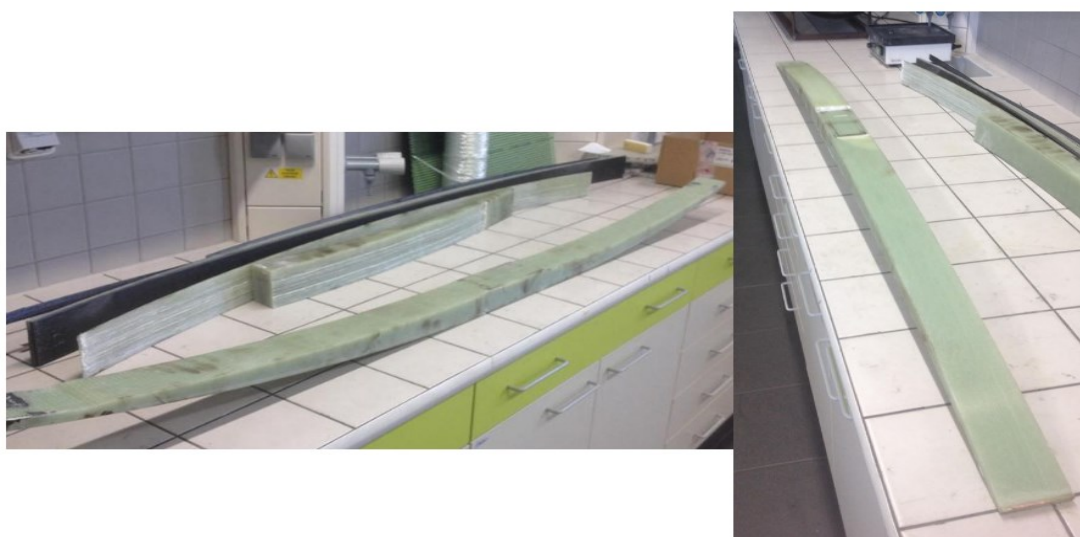


Obrázek č. 55 Postup výroby při vakuovém lisování [19]



Obrázek č. 56 Příklad uložení desky UD Deltapreg při vakuovém lisování

Materiály námi zvolené pro výrobu zkušebních těles mají primární využití na listové parabolické pružiny, které by do budoucna mohli nahradit ocelové produkty tohoto typu v automobilovém průmyslu.



Obrázek č. 57 Listové parabolické pružiny

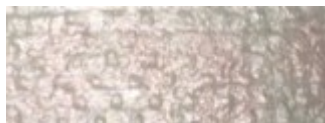
7 PŘÍPRAVA ZKUŠEBNÍCH TĚLES

Pro testování únavového chování kompozitních materiálů byly zhotoveny 3 typy zkušebních těles ze dvou typů vysoko pevnostních materiálů metodou vakuového lisování. Další 3 typy zkušebních těles vyrobené ze stejného druhu materiálu byly vystaveny změně klimatického prostředí v klimatické komoře, následně bude posuzován vliv na statické chování v ohybu a vliv na únavovou životnost těchto těles.

7.1 Použité materiály pro zkušební tělesa

7.1.1 Materiál UD Deltapreg VV430U-DT806R 34%

Jako první materiál byl zvolen skelný prepreg **UD Deltapreg VV430U-DT806R 34%** od italské firmy Delta. Jedná se o materiál s jednosměrnou kontinuální výztuží ze skelných vláken a s hmotnostním obsahem epoxidové pryskyřice 33-34 %. Plošná hmotnost této jednosměrné tkaniny je 430 g/m^2 . Tento materiál dosahuje pevnosti v ohybu $\sigma_o = 818 \text{ MPa}$ a modul pružnosti v ohybu je $E = 37\,400 \text{ MPa}$. [37]



Obrázek č. 58 UD Deltapreg VV430U-DT806R34% [37]

7.1.2 Materiál UD Carbon IMP GV420U-DT806W-37%

Jako druhý materiál byl zvolen uhlíkový prepreg od italské firmy IMP **UD Carbon IMP GV420U-DT806W-37%**. Jedná se rovněž o materiál s jednosměrnou kontinuální výztuží z uhlíkových vláken a s hmotnostním obsahem epoxidové pryskyřice 37 %. Plošná hmotnost této tkaniny je 420 g/m^2 . Tento materiál dosahuje pevnosti v ohybu $\sigma_o = 1\,180 \text{ MPa}$ a modul pružnosti v ohybu je $E = 106\,400 \text{ MPa}$. [37]



Obrázek č. 59 UD Carbon IMP GV420U-DT806W-37% [37]

7.1.3 Matrice

Byl zvolen druh prepregu s epoxidovou pryskyřicí **IMP 503 Z**. Tato pryskyřice je vhodná pro předimpregnování uhlíkových, skelných a aramidových vláken. IMP 503 Z má vysokou čírost a je vhodná pro výrobky, kde je zapotřebí vysoká kvalita povrchu.

Tabulka č. 8 Základní parametry matrice

Plošná hmotnost [g/cm³]	1,15 - 1,25
Doba vytvrzování při 125°C [min]	6 - 9
Doba vytvrzování při 110°C [min]	20 - 26

7.2 Zkušební tělesa posuzována na vliv statického zatížení a únavovou životnost

7.2.1 Zkušební těleso A:

Deska vyrobená z 8 vrstev **UD Deltapreg VV430U-DT806R-34%**.

Rozměry tělesa:

Tabulka č. 9 Rozměry zkušebního tělesa A

Délka - L [mm]	Šířka - b [mm]	Tloušťka - a [mm]
100	20	2,25

7.2.2 Zkušební těleso B:

Deska vyrobená z 8 vrstev **UD Carbon IMP GV420U-DT806W-37%**.

Rozměry tělesa:

Tabulka č. 10 Rozměry zkušebního tělesa B

Délka - L [mm]	Šířka - b [mm]	Tloušťka - a [mm]
100	20	3,3

7.2.3 Zkušební těleso C:

Hybridní deska:

- 2 vrstvy UD carbon IMP 420 g/m² (GV 420 U)
- 4 vrstvy UD deltapreg 34 % 430 g/m² (VV 430 U)
- 2 vrstvy UD carbon IMP 420 g/m² (GV 420 U)

Rozměry tělesa:

Tabulka č. 11 Rozměry zkušebního tělesa C

Délka - L [mm]	Šířka - b [mm]	Tloušťka - a [mm]
100	20	3,4

7.3 Zkušební tělesa posuzována na vliv klimatického zatížení a na základní mechanické vlastnosti při statických zkouškách

7.3.1 Zkušební těleso A1:

Rozměry tělesa:

Tabulka č. 12 Rozměry zkušebního tělesa A1

Délka - L [mm]	Šířka - b [mm]	Tloušťka - a [mm]
150	20	4,5



Obrázek č. 60 Zkušební těleso A1

7.3.2 Zkušební těleso B2:

Rozměry tělesa:

Tabulka č. 13 Rozměry zkušebního tělesa B2

Délka - L [mm]	Šířka - b [mm]	Tloušťka - a [mm]
150	20	5,5



Obrázek č. 61 Zkušební těleso B2

7.3.3 Zkušební těleso C3:

Rozměry tělesa:

Tabulka č. 14 Rozměry zkušebního tělesa C3

Délka - L [mm]	Šířka - b [mm]	Tloušťka - a [mm]
150	20	5,5



Obrázek č. 62 Zkušební těleso C3

8 MECHANICKÉ ZKOUŠKY ZKUŠEBNÍCH TĚLES

8.1 Statické zkoušky ohybem

Jako první byly provedeny statické zkoušky ohybem. Jedná se, o zkoušku jednoosým tříbodovým ohybem, z této zkoušky byl zjištěn modul pružnosti, maximální ohybová síla a mez pevnosti. Statické zkoušky byly provedeny v laboratoři Fakulty technologické na zkušebním stroji ZWICK 1456. Zkušební stroj je určen pro statické zkoušky v ohybu, smyku, tahu a pro dynamické zkoušky probíhající při nízkých cyklech. Součástí tohoto stroje je také teplotní komora, která umožňuje testování vzorků pro vliv klimatického zatížení.

Tabulka č. 15 Základní parametry zkušebního stroje ZWICK 1456

Snímač síly	20 KN a 2,5 KN
Pracovní výška	1 160 mm
Celková šířka	630 mm
Celková výška	2 012 mm
Strojová výška	1 284 mm
Pracovní šířka	420 mm
Hmotnost	150 kg
Maximální zkušební rychlost	750 mm/min



Obrázek č. 63 Zkušební stroj ZWICK 1456 a klimatická komora

Zkušební vzorky byly rozděleny do dvou skupin, první skupina není vystavena vlivu klimatické komory a rozměry zkušebních těles odpovídají tělesům označeným, jako A, B a C.

Druhá skupina zkušebních vzorků byla vystavena účinkům klimatické komory, rozměry zkušebních těles odpovídají tělesům označeným jako A1, B2 a C3.

8.1.1 Podmínky pro testování v klimatické komoře

Podmínky pro testování v klimatické komoře byly nastaveny podle normy: **General corrosion resistance, ISO 4628-3:2003**. Tato norma určuje test korozní odolnosti, je používána pro běžné kovové pružnice.

8.1.2 Uspořádání statické zkoušky v ohybu

Vzdálenost podpěr u statických zkoušek pro tělesa posuzována na vliv statického zatížení a únavovou životnost byla stanovena na $L_p = 80 \text{ mm}$. U zkušebních těles posuzovaných na vliv klimatického zatížení a na mechanické vlastnosti při statických zkouškách, byla vzdálenost podpěr stanovena na $L_p = 64 \text{ mm}$. Rádus u zatěžovacího trnu má hodnotu $R = 5 \text{ mm}$, stejně tak i rádus u podpěry.



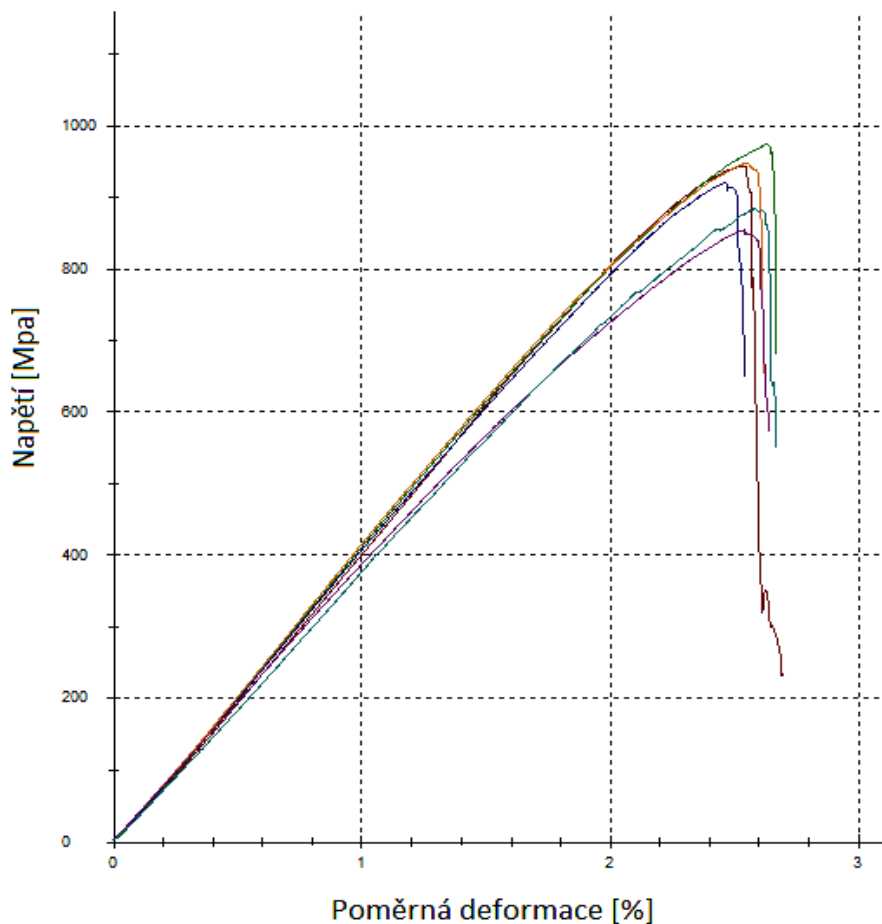
Obrázek č. 64 Uspořádání statické zkoušky v ohybu

8.2 Naměřená a vyhodnocená data na vliv mechanických vlastností při statických zkouškách

V tabulkách č. 16-18 je uveden modul pružnosti v ohybu E_o , mez pevnosti v ohybu σ_{fM} , důležitá maximální ohybová síla $F_{O_{max}}$ nezbytná k porušení zkušebního tělesa, d_L určující průhyb při maximální ohybové síle $F_{O_{max}}$. Z této síly je odvozeno zatížení pro následující cyklické zkoušky. Dále, je uvedena práce W , která je vyvinuta při vyvinutí maximální síly $F_{O_{max}}$. V poslední řadě jsou uvedeny rozměry tělesa a a b .

Tabulka č. 16 Základní mechanické vlastnosti zkušebního tělesa *UD Deltapreg VV430U*
34% získané ze statické zkoušky tříbodovým ohybem

Zk. těleso A: Lp=80mm	E_o [Mpa]	σ_{fM} [Mpa]	$F_{O_{max}}$ [N]	d_L [mm]	W [N.mm ⁻¹]	a [mm]	b [mm]
n = 6							
1.1	36700	884	711	12,9	5160	2,25	19,55
1.2	37200	854	650	13,3	5036	2,2	19,6
1.3	37600	944	754	12,9	5176	2,2	20,3
1.4	39400	974	778	13,4	5623	2,2	20,3
1.5	38200	920	733	12,5	4885	2,2	20,25
1.6	39100	948	755	13	5318	2,2	20,25
Průměrná hodnota	38033	921	730	13	5200	2,2	20
Směrodatná odchylka	974	40,1	41,4	0,3	231	0,01	0,3
Variační koefi- cient [%]	2,6	4,4	5,7	2,3	4,4	0,5	1,5

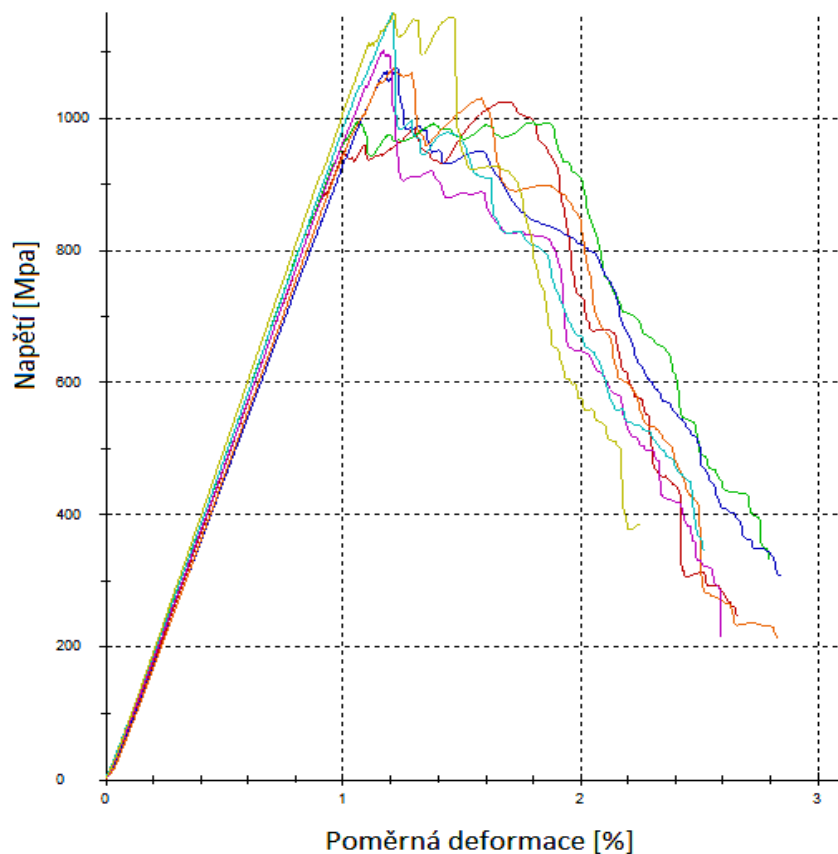


Obrázek č. 65 Závislost napětí na poměrné deformaci zkušebního tělesa UD Deltapreg VV430U 34%

V **tab.č.16** jsou k vidění základní mechanické vlastnosti zkušebního tělesa UD Deltapreg VV 430U 34%. Těleso bylo podrobena statickou zkouškou tříbodovým ohybem. Vzdálenost podpěr byla nastavena na **L_p = 80mm**. Nejdůležitější hodnotou je pro nás maximální ohybová síla **F_{o_{max}}**, z které se odvozuje zatížení pro následující cyklickou zkoušku. Z vyhodnocené průměrné hodnoty síly **F_{o_{max}}** volíme maximální zatížení pro cyklickou zkoušku **F_{max} = 700 N**. V navazujícím grafu vidíme hodnoty meze pevnosti **σ_{fM}**, jejich průměrná hodnoty vykazuje velikost **σ_{fM} = 921 Mpa**.

Tabulka č. 17 Základní mechanické vlastnosti zkušebního tělesa *UD Carbon GV420U* získané ze statické zkoušky tříbodovým ohybem

Zk. těleso B: Lp=80mm n = 7	E_o [Mpa]	σ_{fM} [Mpa]	$F_{O_{max}}$ [N]	d_L [mm]	W [N.mm ⁻¹]	a [mm]	b [mm]
1.1	101000	1159	2091	4,1	4427	3,36	19,65
1.2	95200	1102	2081	3,7	3879	3,4	19,6
1.3	96400	1158	2186	3,8	4182	3,4	19,6
1.4	94700	1025	2060	5,6	7598	3,36	21,9
1.5	96800	995	2000	3,5	3630	3,36	21,9
1.6	92100	1077	2165	4,1	4613	3,36	21,9
1.7	94000	1076	2163	4,1	4562	3,36	21,9
Průměrná hodnota	95743	1085	2107	4,1	4699	3,4	20,9
Směrodatná odchylka	25878	57	62,5	0,6	1230	0,01	1,1
Variační koeficient [%]	27	5,3	3	14,6	26,2	0,3	5,26

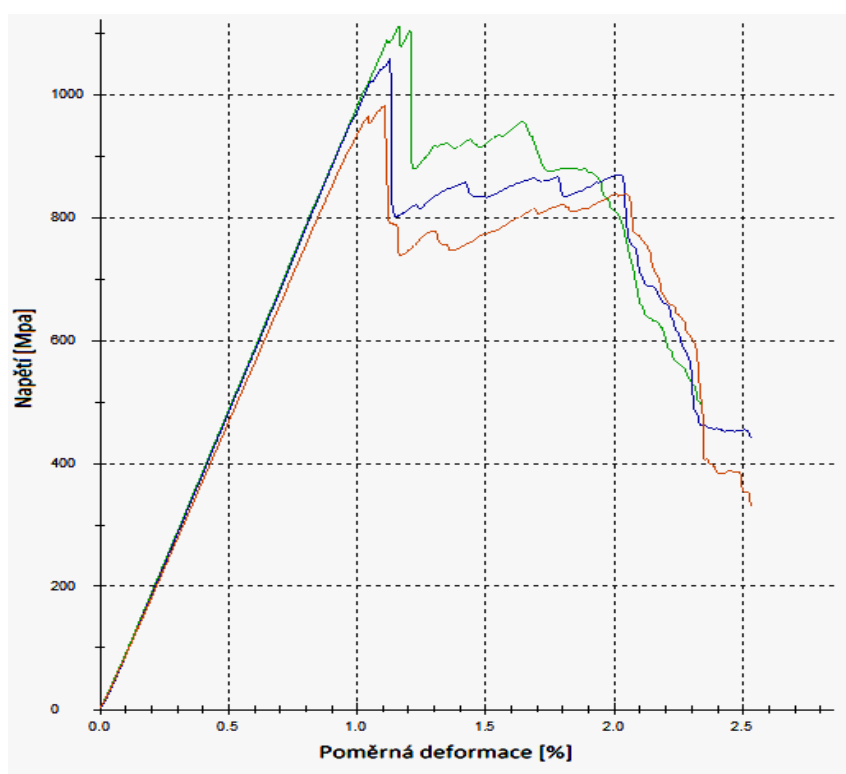


Obrázek č. 66 Závislost napětí na poměrné deformaci zkušebního tělesa UD Carbon
GV420U

V **tab. č.17** jsou k vidění základní mechanické vlastnosti zkušebního tělesa UD Carbon GV420U. Průměrná hodnota pro nás důležité síly vykazuje hodnotu $F_{0max} = 2107 \text{ N}$, z této hodnoty dále určíme, že maximální zatížení pro cyklickou zkoušku volíme $F_{max} = 2100 \text{ N}$. V navazujícím grafu vidíme hodnoty meze pevnosti σ_{fM} , jejich průměrná hodnota dosahuje velikosti $\sigma_{fM} = 1085 \text{ Mpa}$.

Tabulka č. 18 Základní mechanické vlastnosti zkušební tělesa *Hybridní deska* získané ze statické zkoušky tříbodovým ohybem

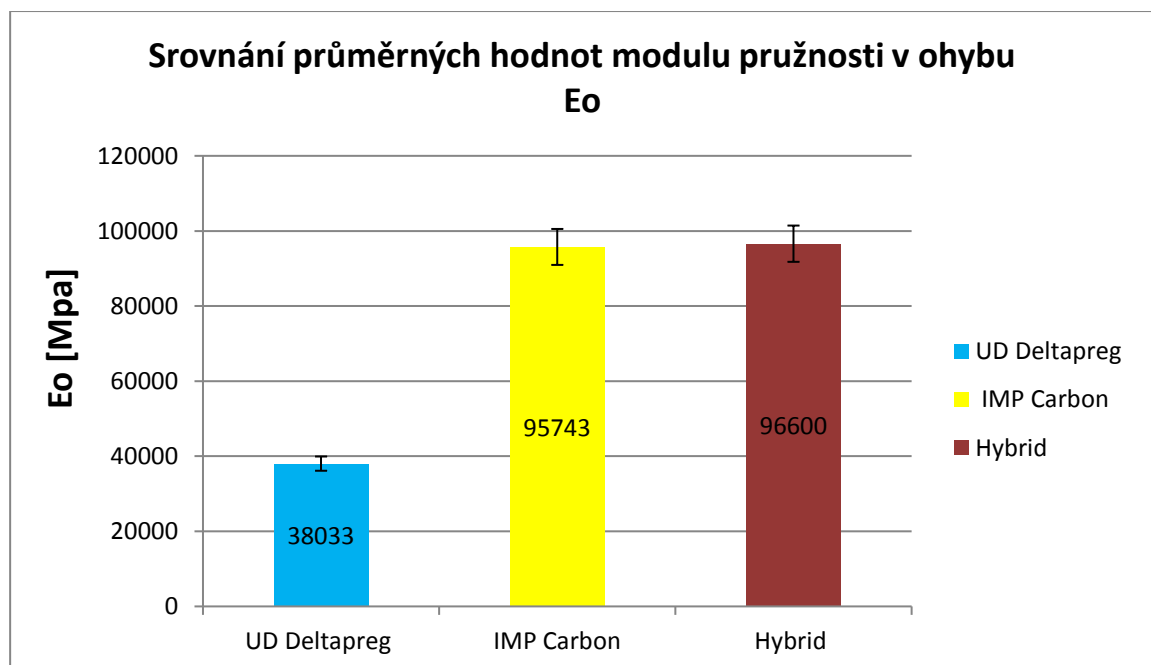
Zk. těleso C: Lp=80mm n = 3	E_o [Mpa]	σ_{fM} [Mpa]	Fo_{max} [N]	d_L [mm]	W [N.mm ⁻¹]	a [mm]	b [mm]
1.1	97900	1113	1580	4,3	3496	3	19,4
1.2	98000	1059	1519	4,2	3294	3	19,6
1.3	93900	983	1395	4,1	3037	3	19,4
Průměrná hodnota	96600	1051	1498	4,2	3276	3	19,5
Směrodatná odchylka	1910	53	77	0,1	188	0	0,1
Variační koeficient [%]	2	5	5,1	2,4	5,7	0	0,5



Obrázek č. 67 Závislost napětí na poměrné deformaci zkušební tělesa *Hybridní deska*

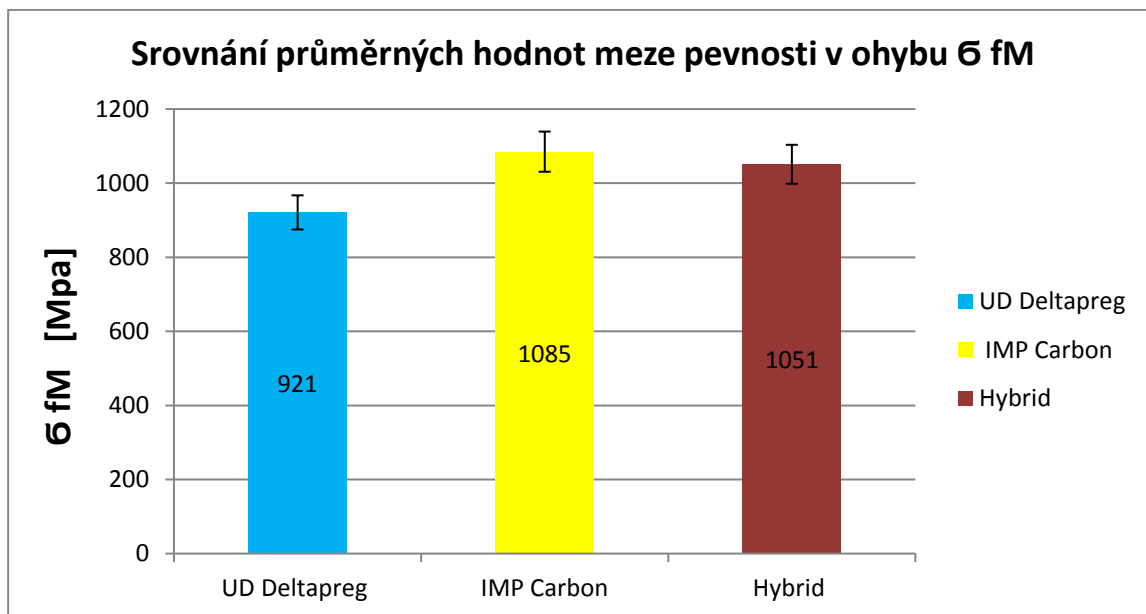
V **tab.č.18** jsou k vidění základní mechanické vlastnosti zkušební tělesa Hybridní deska, která je složena z 2 vrstev UD Carbon IMP GV420U a ze 4 vrstev UD Deltapreg VV 430U 34%. Průměrná hodnota pro nás důležité síly vykazuje hodnotu $F_{o_{max}} = 1498 \text{ N}$, z této hodnoty dále určujeme, že maximální zatížení pro cyklickou zkoušku volíme $F_{max} = 1500 \text{ N}$. V navazujícím grafu vidíme hodnoty meze pevnosti σ_{fM} , jejich průměrná hodnota dosahuje velikosti $\sigma_{fM} = 1051 \text{ Mpa}$.

8.2.1 Porovnání základních mechanických vlastností a maximálního zatížení pro cyklické zkoušky $F_{o_{max}}$



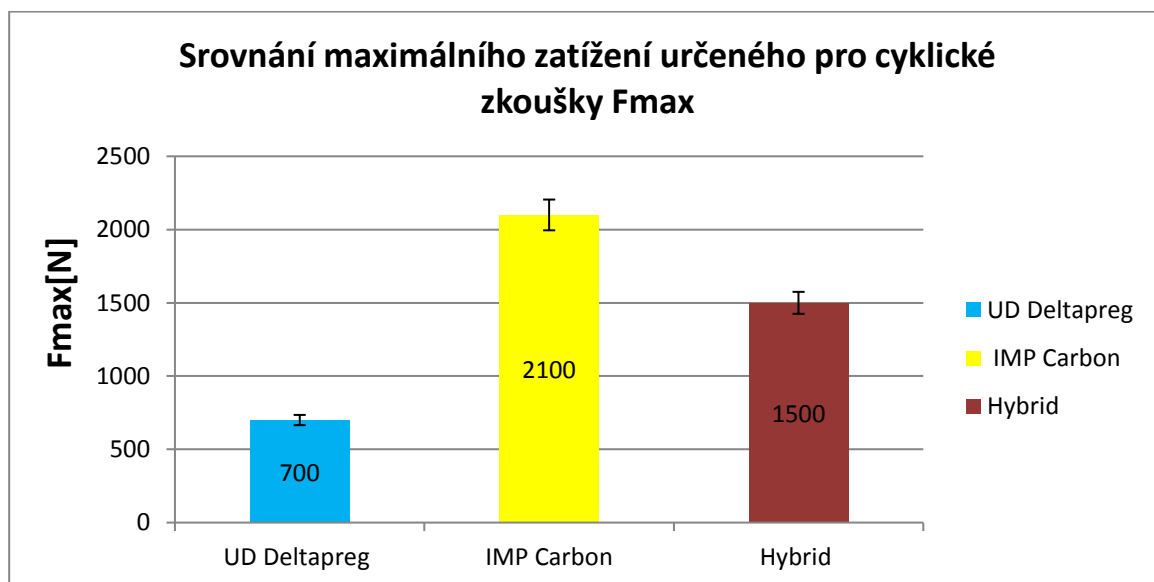
Obrázek č. 68 Srovnání průměrných hodnot modulu pružnosti v ohybu

V sloupcovém grafu **č.68** vidíme srovnání průměrných hodnot modulu pružnosti v ohybu E_o . Jako nejlepší z trojice zkoušených materiálů se jeví hybridní deska.



Obrázek č. 69 Srovnání průměrných hodnot pevnosti v ohybu

V sloupcovém grafu č.69 můžeme vidět srovnání průměrných hodnot meze pevnosti v ohybu σ_{fM} . Jako nejlepší vychází z této trojice zkušební těleso vyrobené z materiálu IMP Carbon.



Obrázek č. 70 Srovnání maximálního zatížení určené pro cyklické zkoušky

V sloupcovém grafu č.70 vidíme srovnání maximálního zatížení F_{max} , které jsme určili pro následné cyklické zkoušky. Největší zatížení je použito pro materiál IMP Carbon.

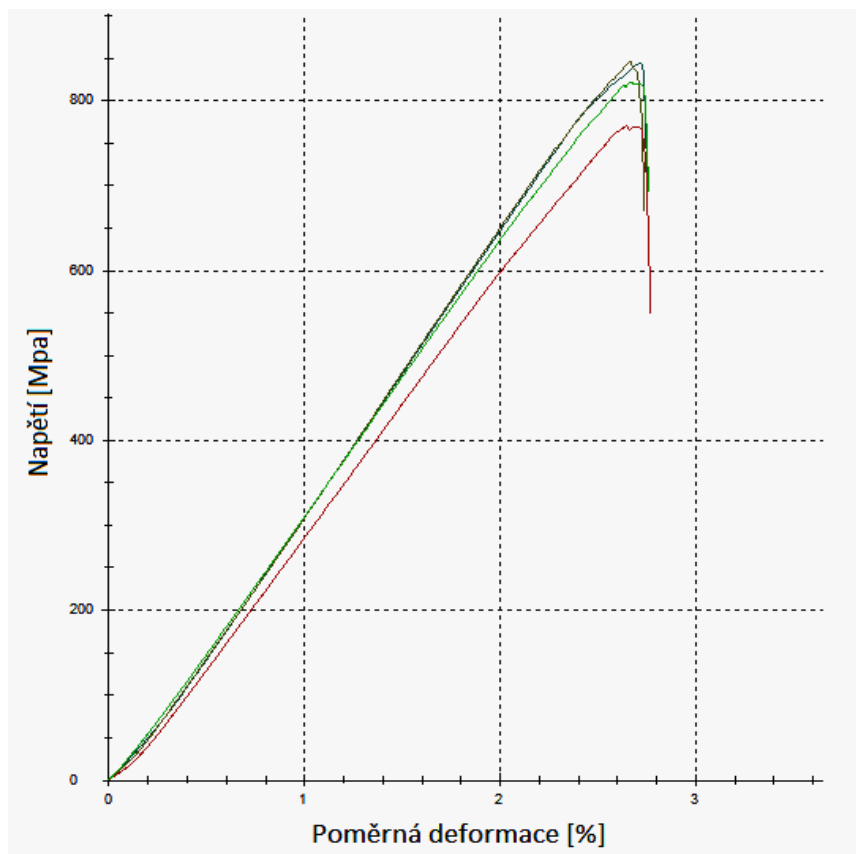
8.3 Naměřená a zpracovaná data zkušebních těles posuzovaných na vliv klimatického zatížení na mechanické vlastnosti při statických zkouškách

V tabulkách č.19-21 jsou uvedeny základní mechanické vlastnosti zkušebních těles UD Deltapreg VV430U 34%, UD Carbon IMP GV 420U a Hybridní desky, tyto tělesa nebyla podrobena klimatickému zatížení. V tabulkách č. 22-24 byla tělesa podrobena klimatickému zatížení. Statická zkouška byla provedena nejprve bez klimatického zatížení, následně byla provedena poté, co byly totožná tělesa vystaveny klimatickému zatížení. Tyto tělesa pak byly vzájemně srovnávány. Z důvodu odlišných rozměrů zkušebních těles byla vzdálenost podpěr L_p u statické zkoušky zvolena na $L_p=64\text{mm}$.

8.3.1 Zkušební tělesa bez klimatického zatížení

Tabulka č. 19 Základní mechanické vlastnosti zkušebního tělesa UD Deltapreg VV 430U 34% bez klimatického zatížení

Zk. těleso A1:	E_o [Mpa]	σ_{fM} [Mpa]	$F_{O_{max}}$ [N]	d_L [mm]	W [$N \cdot mm^{-1}$]	a [mm]	b [mm]
$L_p=64\text{mm}$							
n = 4							
1.1	33800	845	3762	4	7729	4,6	20,2
1.2	34400	847	3770	4	7458	4,6	20,2
1.3	31500	770	3429	3,9	6753	4,6	20,2
1.4	32900	821	3656	4	7408	4,6	20,2
Průměrná hodnota	33150	821	3654	4	7337	4,6	20,2
Směrodatná odchylka	1092	31	138	0,04	359	0	0
Variační koeficient [%]	3,3	3,8	3,8	0,01	4,9	0	0

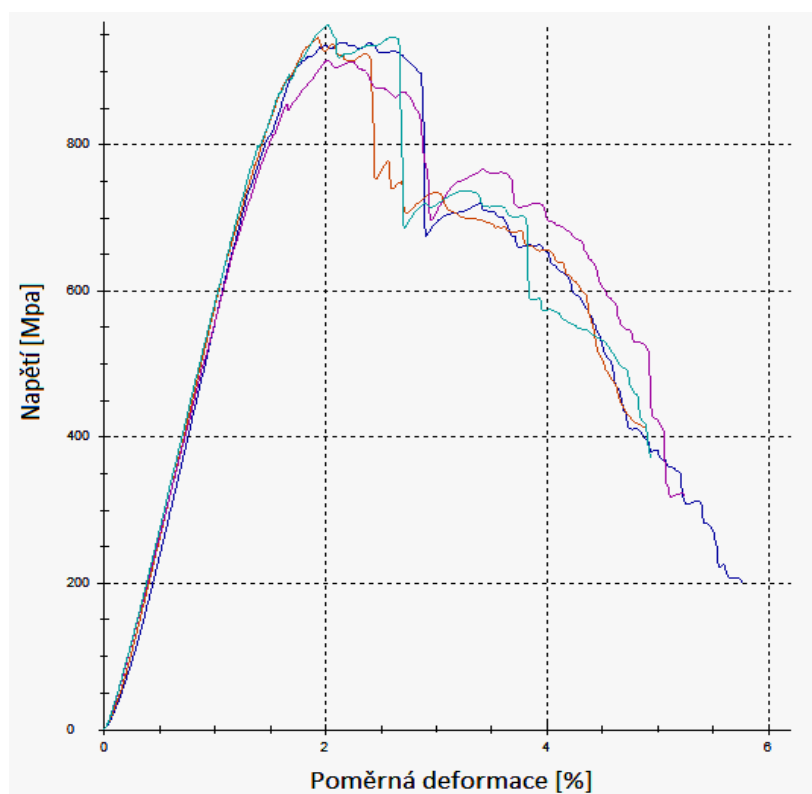


Obrázek č. 71 Závislost napětí na poměrné deformaci zkušebního tělesa UD Deltapreg VV430U 34%

V **tab.č.19** jsou k vidění základní mechanické vlastnosti zkušebního tělesa UD Deltapreg VV430U bez klimatického zatížení. Průměrná hodnota meze pevnosti σ_{fM} , kterou vidíme v navazujícím grafu, vykazuje hodnotu **821 Mpa**.

Tabulka č. 20 Základní mechanické vlastnosti zkušebního tělesa UD Carbon IMP GV420U
bez klimatického zatížení

Zk. těleso B2: Lp=64mm	E_o [Mpa]	σ_{fM} [Mpa]	Fo_{max} [N]	d_L [mm]	W [$N \cdot mm^{-1}$]	a [mm]	b [mm]
n = 4							
1.1	64100	940	5296	2,8	8731	5,2	20
1.2	63800	947	5337	2,5	7489	5,2	20
1.3	58900	915	5156	2,6	7850	5,2	20
1.4	62400	964	5431	2,7	8251	5,2	20
Průměrná hodnota	62300	942	5305	2,7	8080	5,2	20
Směrodatná odchylka	2065	17,6	99	0,1	462	0	0
Variační koefi- cient [%]	3,3	1,9	1,9	3,7	5,7	0	0

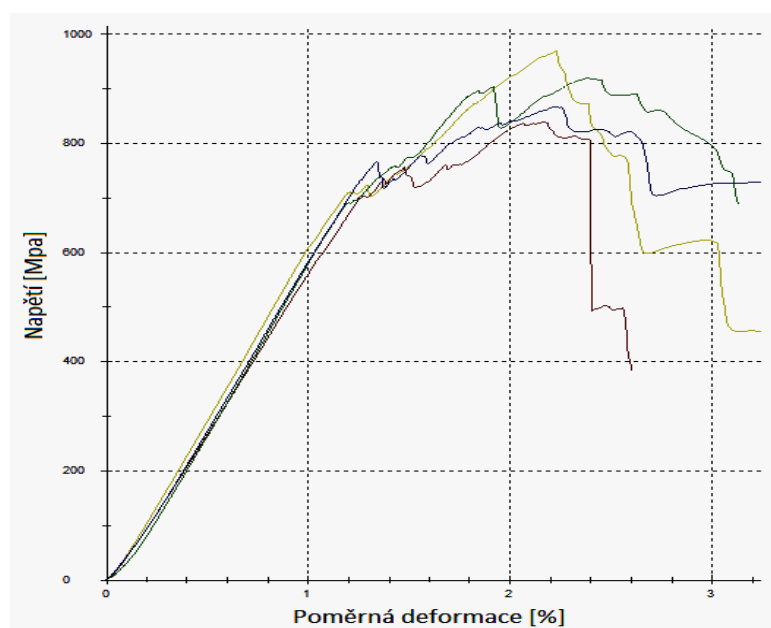


Obrázek č. 72 Závislost napětí na poměrné deformaci zkušebního tělesa UD Carbon IMP 420U

V **tab.č.20** jsou k vidění základní mechanické vlastnosti zkušebního tělesa UD Carbon IMP bez klimatického zatížení. Průměrná hodnota meze pevnosti σ_{fM} , kterou vidíme v navazujícím grafu, vykazuje hodnotu **942 Mpa**.

Tabulka č. 21 Základní mechanické vlastnosti zkušební tělesa Hybridní deska bez klimatického zatížení

Zk. těleso C3: Lp=64mm n = 4	E_o [Mpa]	σ_{fM} [Mpa]	$F_{O_{max}}$ [N]	d_L [mm]	W [$N \cdot mm^{-1}$]	a [mm]	b [mm]
1.1	64000	970	3911	3,5	8035	4,4	20
1.2	59400	840	3388	3,4	7091	4,4	20
1.3	63400	920	3711	3,7	8608	4,4	20
1.4	62500	868	3499	3,5	7704	4,4	20
Průměrná hodnota	62325	900	3627	3,5	7860	4,4	20
Směrodatná odchylka	1771	50	201	0,1	549	0	0
Variační koeficient [%]	2,8	5,5	5,5	2,9	6,7	0	0



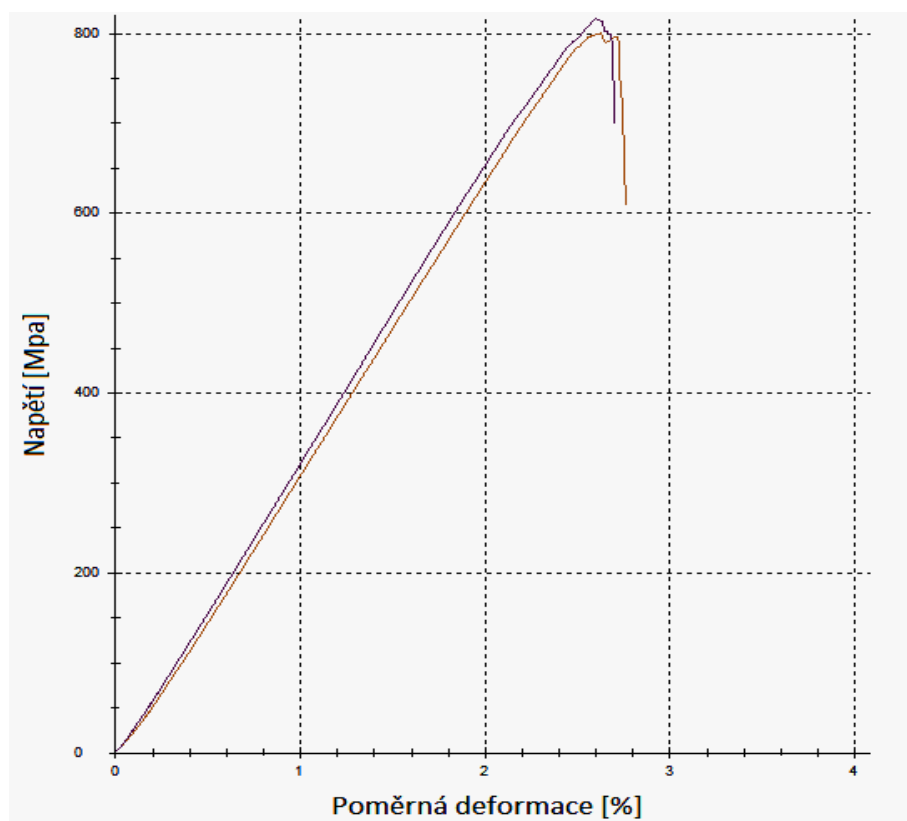
Obrázek č. 73 Závislost napětí na poměrné deformaci zkušební tělesa Hybridní deska

V **tab.č.21** jsou k vidění základní mechanické vlastnosti zkušebního tělesa Hybridní deska bez klimatického zatížení. Průměrná hodnota meze pevnosti σ_{fM} , kterou vidíme v navazujícím grafu, vykazuje hodnotu **900 Mpa**.

8.3.2 Zkušební tělesa s klimatickým zatížením

Tabulka č. 22 *Základní mechanické vlastnosti zkušebního tělesa UD Deltapreg VV 430U
34% s klimatickým zatížením*

Zk. těleso A1: Lp=64mm	E_o [Mpa]	σ_{fM} [Mpa]	F_{Omax} [N]	d_L [mm]	W [N.mm ⁻¹]	a [mm]	b [mm]
n = 2							
1.1	32800	800	3052	3,9	6068	4,6	17,3
1.2	33400	816	3325	3,8	6464	4,7	17,7
Průměrná hodnota	33100	808	3189	3,85	6266	4,65	17,5
Směrodatná odchylka	300	8	137	0,1	198	0,05	0,2
Variační koefi- cient [%]	0,9	0,1	4,3	2,6	3,2	1,1	1,1

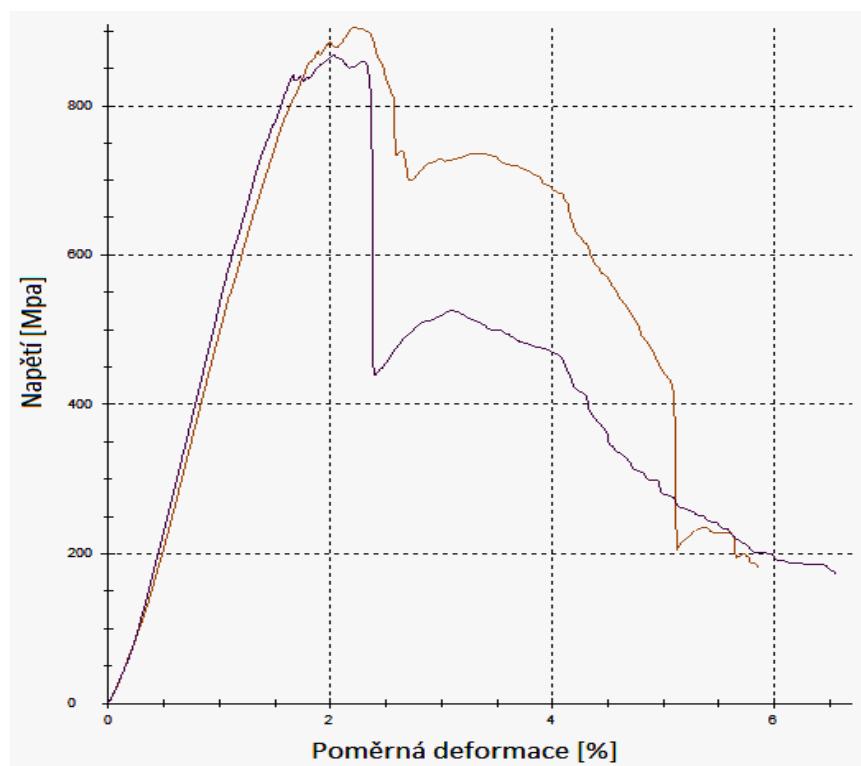


Obrázek č. 74 Závislost napětí na poměrné deformaci zkušebního tělesa UD Deltapreg VV430U 34%

V **tab.č.22** jsou k vidění základní mechanické vlastnosti zkušebního tělesa UD Deltapreg VV430U 34% s klimatickým zatížením. Průměrná hodnota meze pevnosti σ_{fM} , kterou vidíme v navazujícím grafu, vykazuje hodnotu **808 Mpa**.

Tabulka č. 23 Základní mechanické vlastnosti zkušební tělesa UD CARBON IMP
GV420U s klimatickým zatížením

Zk. těleso B2: Lp=64mm n = 2	E_o [Mpa]	σ_{fM} [Mpa]	$F_{O_{max}}$ [N]	d_L [mm]	W [$N \cdot mm^{-1}$]	a [mm]	b [mm]
1.1	58000	905	4386	2,9	7244	5,2	17,2
1.2	60600	867	4203	2,7	6443	5,2	17,2
Průměrná hodnota	59300	886	4295	2,8	6844	5,2	17,2
Směrodatná odchylka	1300	19	92	0,1	401	0	0
Variační koefi- cient [%]	2,2	2,1	2,1	3,6	5,9	0	0

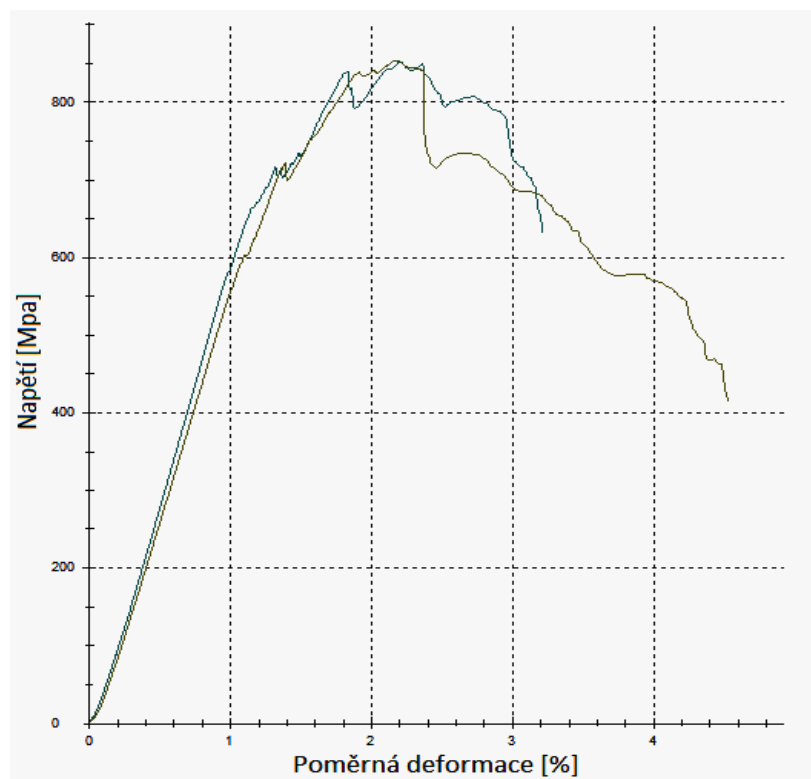


Obrázek č. 75 Závislost napětí na poměrné deformaci zkušební tělesa UD Carbon IMP
GV420U

V **tab.č.23** jsou k vidění základní mechanické vlastnosti zkušební tělesa UD Carbon IMP GV420U s klimatickým zatížením. Průměrná hodnota meze pevnosti σ_{fM} , kterou vidíme v navazujícím grafu, vykazuje hodnotu **886 Mpa**.

Tabulka č. 24 Základní mechanické vlastnosti zkušební tělesa Hybridní deska s klimatickým zatížením

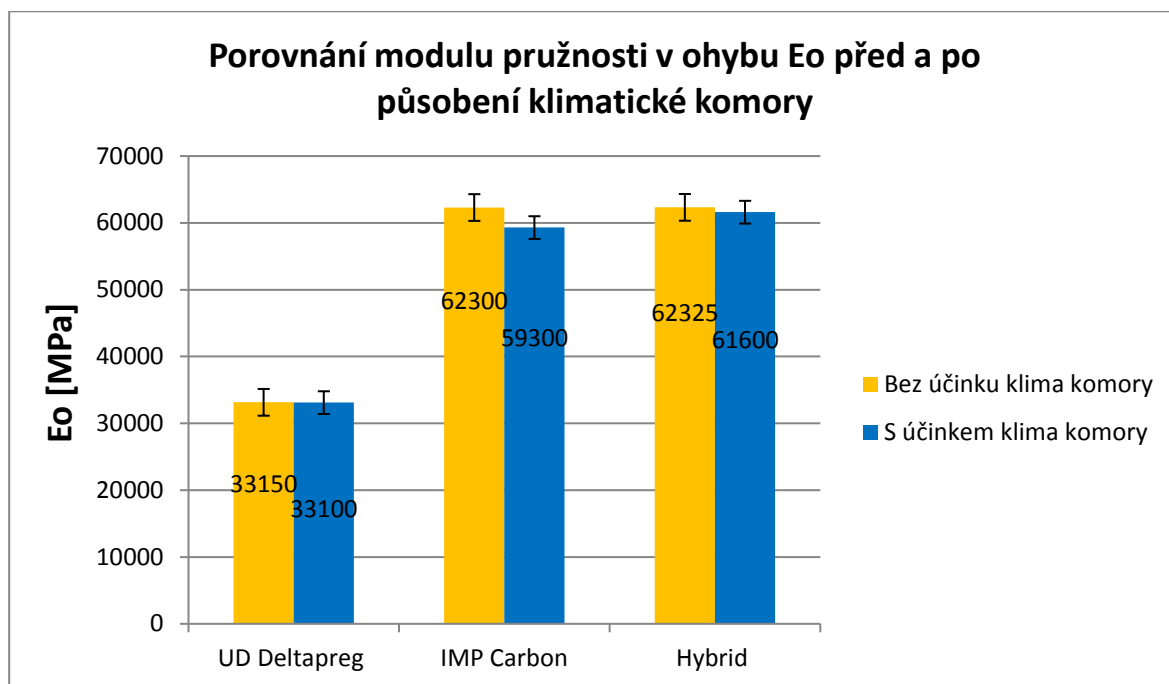
Zk. těleso C3: Lp=64mm	E_o [Mpa]	σ_{fM} [Mpa]	Fo_{max} [N]	d_L [mm]	W [N.mm ⁻¹]	a [mm]	b [mm]
n = 2							
1.1	63300	852	2955	3,4	6472	4,4	17,2
1.2	59900	854	2963	3,4	6139	4,4	17,2
Průměrná hodnota	61600	853	2959	3,4	6306	4,4	17,2
Směrodatná odchylka	1700	1	4	0	167	0	0
Variační koefi- cient [%]	2,8	0,1	0,1	0	2,6	0	0



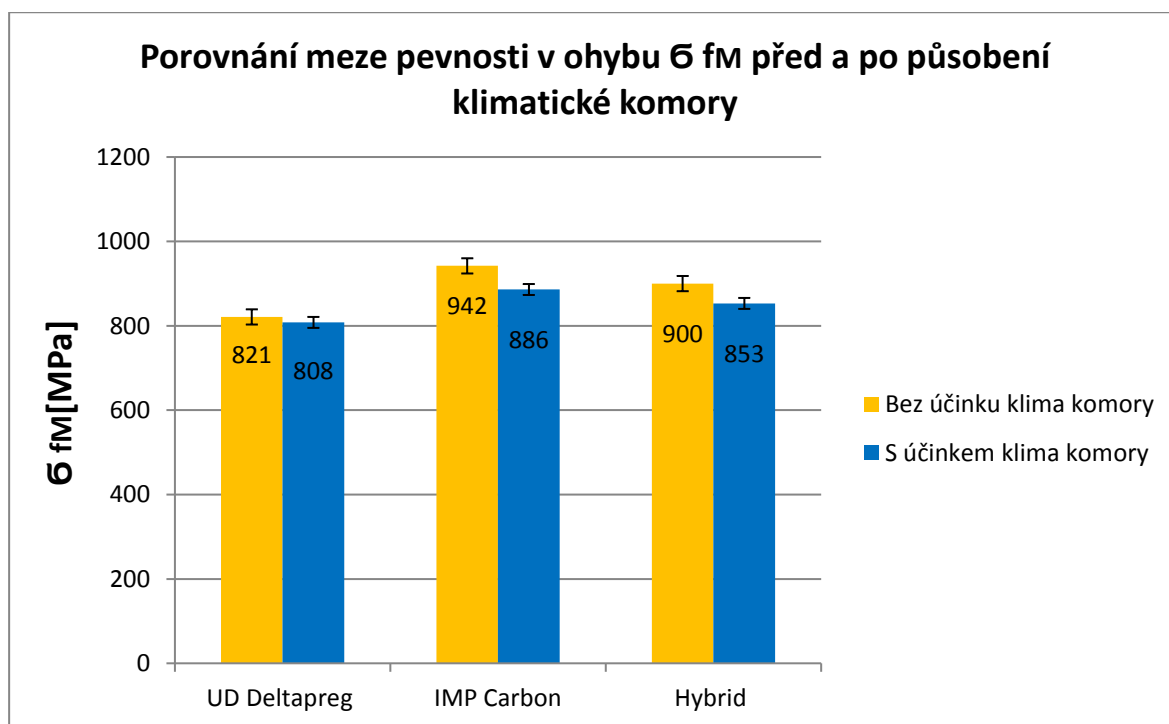
Obrázek č. 76 Závislost napětí na poměrné deformaci zkušebního tělesa Hybridní deska

V **tab.č.24** jsou k vidění základní mechanické vlastnosti zkušebního tělesa Hybridní deska s klimatickým zatížením. Průměrná hodnota meze pevnosti σ_{fM} , kterou vidíme v navazujícím grafu, vykazuje hodnotu **853 Mpa**.

8.3.3 Vyhodnocení a porovnání výsledků zkušebních těles s klimatickým a bez klimatického zatížení



Obrázek č. 77 Srovnání modulu pružnosti před a po klimatickém zatížení



Obrázek č. 78 Srovnání meze pevnosti před a po klimatickém zatížení

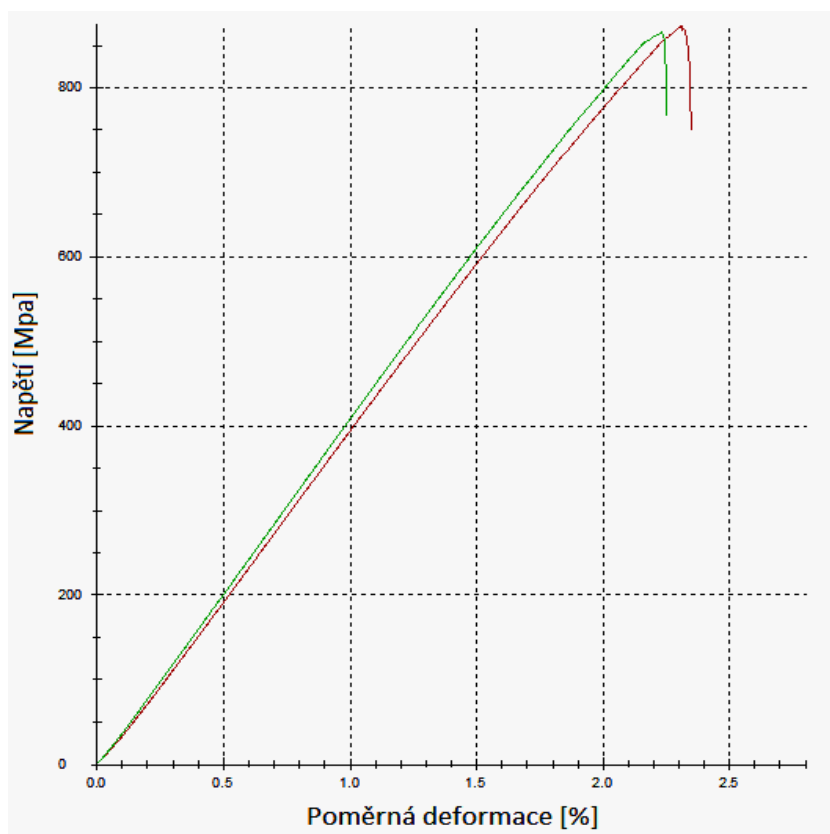
Na sloupcových grafech č.77 a č.78 je k vidění srovnání modulu pružnosti v ohybu E_o a meze pevnosti v ohybu σ_{fM} před a po působení klimatického zatížení. Nejvyšší rozdíl vykazuje před a po působení materiál IMP Carbon. Tyto rozdíly jsou však minimální, to dokazuje, že materiál se chová příznivě i po změně klimatického prostředí.

8.3.4 Statická zkouška těles pro testování cyklickým zatížením s vlivem a bez vlivu klimatického zatížení

V tabulkách č. 25-27 jsou k vidění základní mechanické vlastnosti materiálů UD Deltapreg VV 430U 34%, UD Carbon IMP GV420U a Hybridní desky. Statická zkouška byla provedena v třibodovém uspořádání ve vzdálenosti podpor $L_p = 120 \text{ mm}$. U cyklického zatěžování byla vzdálenost podpor, nastavena na $L_p = 64 \text{ mm}$. U vzdálenosti $L_p = 120 \text{ mm}$ je vzorek příliš poddajný, v podpěrách se vrací a nejsme schopni vyladit optimální nastavení stroje.

Tabulka č. 25 Základní mechanické vlastnosti zkušební tělesa UD Deltapreg VV430U 34% získané ze statické zkoušky třibodovým ohybem

Zkušební těleso A3: $L_p = 120 \text{ mm}$	E_o [Mpa]	σ_{fM} [Mpa]	$F_{O_{max}}$ [N]	d_L [mm]	W [$N \cdot mm^{-1}$]	a [mm]	b [mm]
n = 2							
1.1	37800	873	1878	12,6	12173	4,4	20
1.2	40400	866	1862	12,2	11778	4,4	20
Průměrná hodnota	39100	870	1870	12,4	11976	4,4	20
Směrodatná odchylka	1300	3,5	8	0,2	198	0	0
Variační koeficient [%]	3,3	0,4	0,4	1,6	1,7	0	0



Obrázek č. 79 Závislost napětí na poměrné deformaci zkušebního tělesa UD Deltapreg VV 430U 34%

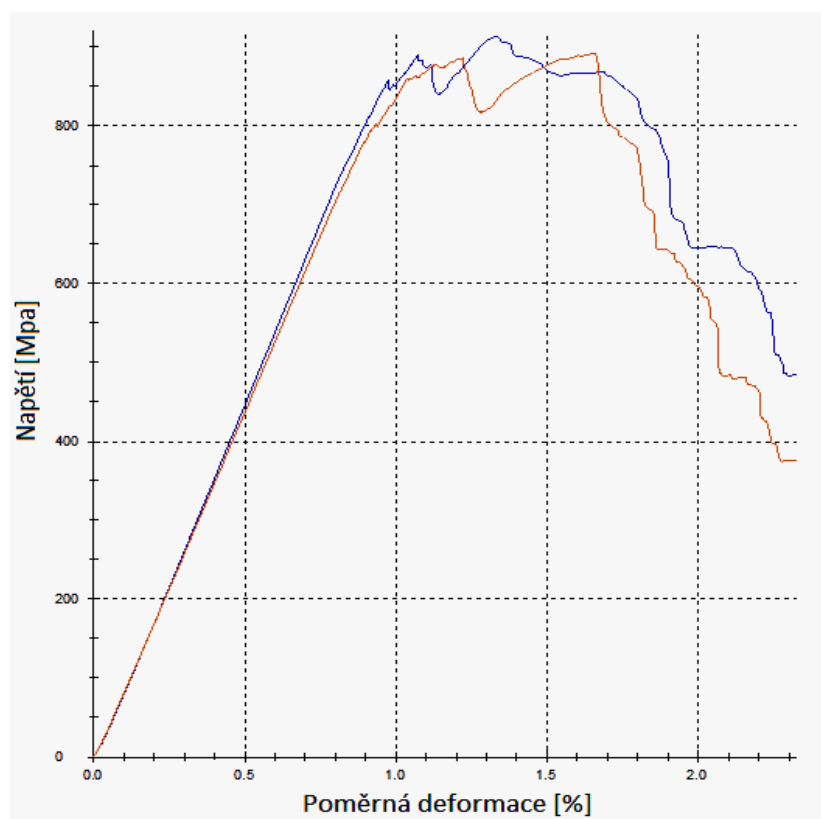


Obrázek č. 80 Tříbodové uspořádání statické zkoušky tělesa UD Deltapreg VV 430U 34%

V **tab.č.25** jsou k vidění základní mechanické vlastnosti zkušební tělesa UD Deltapreg VV 430U 34%. Těleso bylo podrobena statickou zkouškou tříbodovým ohybem. Vzdálenost podpěr byla nastavena na **$L_p = 120$ mm**. Nejdůležitější hodnotou je pro nás maximální ohybová síla **$F_{o_{max}}$** , z které se odvozuje zatížení pro následující cyklickou zkoušku. Z vyhodnocené průměrné hodnoty síly **$F_{o_{max}}$** volíme maximální zatížení pro cyklickou zkoušku **$F_{max} = 1870$ N**. V navazujícím grafu vidíme hodnoty meze pevnosti **σ_{fM}** , jejich průměrná hodnota vykazuje velikost **$\sigma_{fM} = 870$ Mpa**.

Tabulka č. 26 Základní mechanické vlastnosti zkušební tělesa UD Carbon IMP GV420U získané ze statické zkoušky tříbodovým ohybem

Zkušební těleso B3: Lp=120mm	E_o [Mpa]	σ_{fM} [Mpa]	$F_{o_{max}}$ [N]	d_L [mm]	W [$N \cdot mm^{-1}$]	a [mm]	b [mm]
n = 2							
1.1	89800	913	2744	6,2	10218	5,2	20
1.2	87900	892	2786	7,5	14133	5,2	20
Průměrná hodnota	88850	903	2765	6,9	12176	5,2	20
Směrodatná odchylka	950	10,5	21	0,7	1956	0	0
Variační koeficient [%]	1,1	1,2	0,8	10,1	16,1	0	0



Obrázek č. 81 Závislost napětí na poměrné deformaci zkušebního tělesa UD Carbon IMP
GV 420U

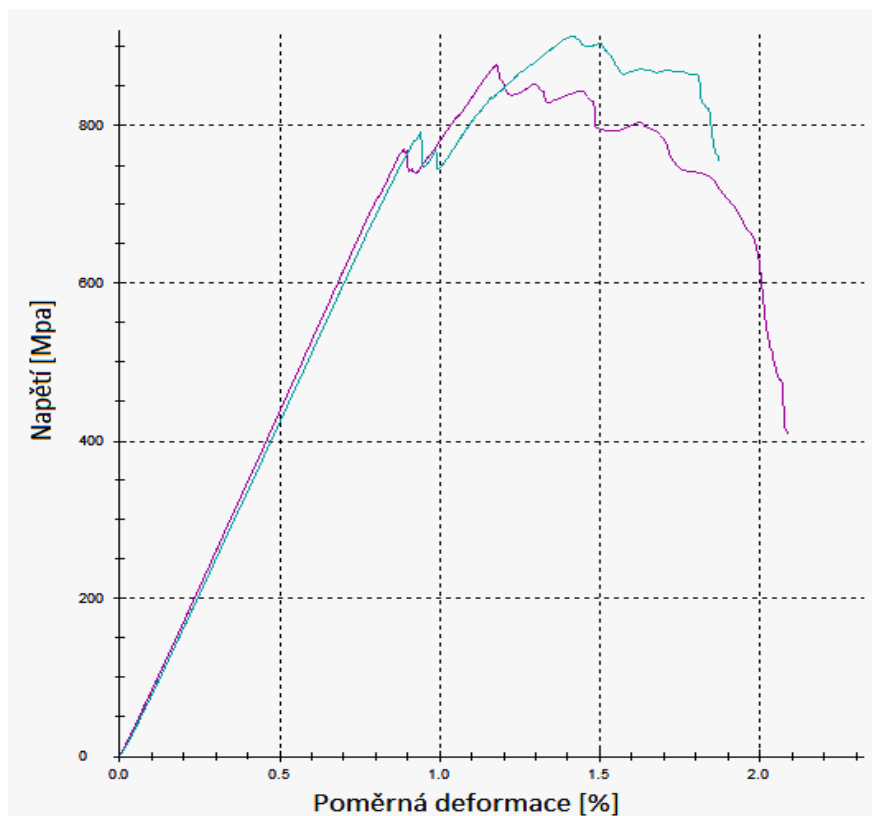


Obrázek č. 82 Tříbodové uspořádání statické zkoušky tělesa UD Carbon IMP GV420 U

V **tab.č.26** jsou k vidění základní mechanické vlastnosti zkušební tělesa UD Carbon IMP GV 420 U. Těleso bylo podrobena statickou zkouškou třibodovým ohybem. Vzdálenost podpěr byla nastavena na $L_p = 120 \text{ mm}$. Z vyhodnocené průměrné hodnoty síly $F_{o_{max}}$ volíme maximální zatížení pro cyklickou zkoušku $F_{max} = 2765 \text{ N}$. V navazujícím grafu vidíme hodnoty meze pevnosti σ_{fM} , jejich průměrná hodnota vykazuje velikost $\sigma_{fM} = 903 \text{ Mpa}$.

Tabulka č. 27 Základní mechanické vlastnosti zkušební tělesa *Hybridní deska* získané ze statické zkoušky třibodovým ohybem

Zkušební těleso C3: Lp=120mm	E_o [Mpa]	σ_{fM} [Mpa]	$F_{o_{max}}$ [N]	d_L [mm]	W [N.mm ⁻¹]	a [mm]	b [mm]
n = 2							
1.1	87400	877	1720	6,7	6465	4,3	20
1.2	85300	913	1876	7,9	8884	4,3	20
Průměrná hodnota	86350	895	1798	7,3	7675	4,3	20
Směrodatná odchylka	1050	18	78	0,6	1210	0	0
Variační koeficient [%]	1,2	2	4,3	8,2	15,8	0	0



Obrázek č. 83 Závislost napětí na poměrné deformaci zkušebního tělesa Hybridní deska



Obrázek č. 84 Třibodové uspořádání statické zkoušky tělesa Hybridní deska

V **tab.č.27** jsou k vidění základní mechanické vlastnosti zkušební tělesa Hybridní deska. Těleso bylo podrobena statickou zkouškou třibodovým ohybem. Vzdálenost podpěr byla nastavena na $L_p = 120 \text{ mm}$. Z vyhodnocené průměrné hodnoty síly $F_{o_{max}}$ volíme maximální zatížení pro cyklickou zkoušku $F_{max} = 1800 \text{ N}$. V navazujícím grafu vidíme hodnoty meze pevnosti σ_{fM} , jejich průměrná hodnota vykazuje velikost $\sigma_{fM} = 895 \text{ Mpa}$.

8.4 Cyklické únavové zkoušky

Únavové cyklické zkoušky byly prováděny ve specializované laboratoři Centra polymerních systémů Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně. Na tyto zkoušky byl využíván zkušební stroj INSTRON 8871. Stroj je určen primárně pro cyklické únavové zkoušky. Základna stroje je vybavena drážkou, která umožňuje upnout širokou škálu komponentů pro různé typy zkoušek. Cyklické zkoušky jsou prováděny cyklickým ohybovým zatížením s třibodovým uspořádáním. Vzdálenost mezi podpěrami je u zkušebních těles totožná, jako u zkoušky se statickým zatížením.

Tabulka č. 28 Základní parametry zkušebního stroje INSTRON 8871

Axiální síla	25 KN
Pracovní výška	1 067 mm
Celková šířka	815 mm
Celková výška	2 014 mm
Strojová výška	1 284 mm
Pracovní šířka	455 mm
Hmotnost	260 kg



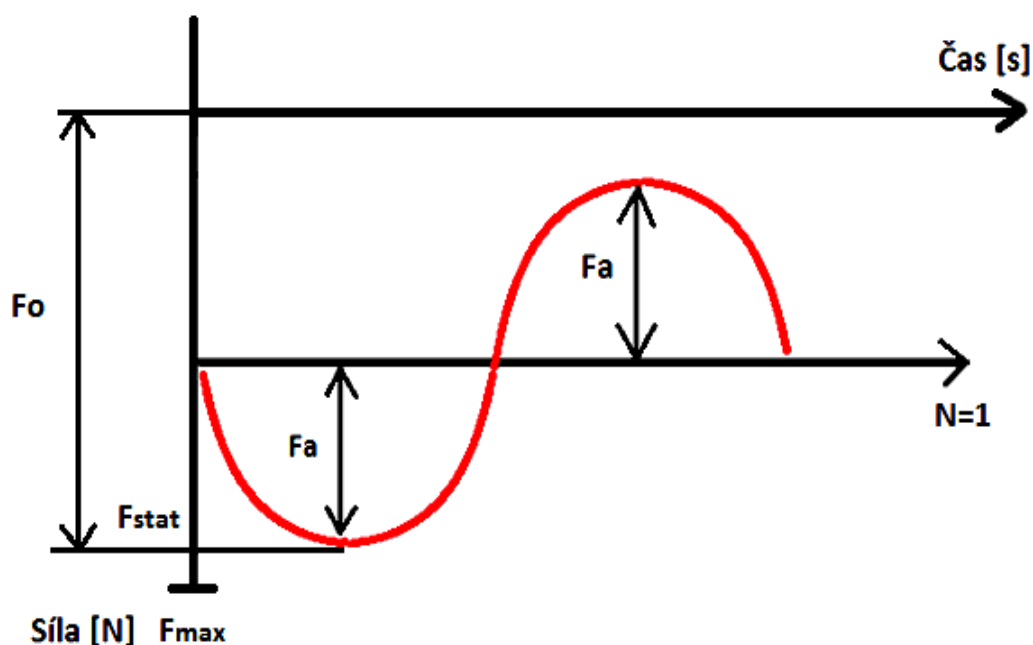
Obrázek č. 85 Zkušební stroj INSTRON 8871



Obrázek č. 86 Tříbodové uspořádání cyklické ohybové zkoušky

8.4.1 Vstupní parametry cyklické zkoušky

Před zahájením samotné zkoušky bylo provedeno několik kontrolních měření. Z těchto měření byla zvolena frekvence zatěžování 3 Hz a počet maximálních cyklů $N = 500\,000$. Velikost zatížení F_{stat} byla zvolena vzhledem k materiálu na 80%, 90% a 95% z maximální ohybové síly, která byla určena ze statické zkoušky F_{max} . Jako další parametr byla zvolena síla kmitu F_o a amplituda zatěžování F_a . Zatěžovací křivka má sinusový průběh. Přehled jednotlivých zatížení je uveden v následujících tabulkách č. 29-31.



Obrázek č. 87 Sinusový průběh zatížení

Tabulka č. 29 Parametry zatížení cyklické zkoušky zkušebních těles z materiálu UD
DELTAPEG VV430U 34%

UD Deltapreg	Velikost zatížení	
	80% F_{max}	90% F_{max}
$F_{stat.max}$ [N]	700	700
Frekvence [Hz]	3	3
F_{stat} [N]	560	630
F_a [N]	250	250
F_o [N]	310	310

Pro nedostatek zkušebních těles byly u zkušebního tělesa UD Deltapreg VV430U zvoleny pouze dvě zkušební hladiny a to 80% a 90% z F_{max} .

Tabulka č. 30 Parametry zatížení cyklické zkoušky zkušebních těles z materiálu UD
CARBON IMP GV 420U

Carbon IMP	Velikost zatížení		
	80% F_{max}	90% F_{max}	95% F_{max}
$F_{stat.max}$ [N]	2100	2100	2100
Frekvence [Hz]	3	3	3
F_{stat} [N]	1680	1890	1995
F_a [N]	750	750	750
F_o [N]	930	1140	1245

Tabulka č. 31 *Parametry zatížení cyklické zkoušky zkušebních těles HYBRIDNÍ DESKA*

Hybridní deska	Velikost zatížení		
	80% F_{max}	90% F_{max}	95% F_{max}
$F_{stat.max}$ [N]	1500	1500	1500
Frekvence [Hz]	3	3	3
F_{stat} [N]	1200	1350	1425
F_a [N]	550	550	550
F_o [N]	650	800	875

9 VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ CYKLICKÝCH ZKOUŠEK

Pro vyhodnocení studia únavového chování byly porovnány výsledky zkušebních těles UD Deltapreg VV430U 34%, UD Carbon IMP GV430U a Hybridní desky. Tyto materiály byly testovány až do úplného porušení tělesa. V případě, že těleso vydrželo námi určený počet cyklů namáhání, byla provedena statická zkouška v ohybu, která určila zbytkovou pevnost tohoto zkušebního tělesa.

9.1 Zkušební těleso A: UD Deltapreg VV430U 34%

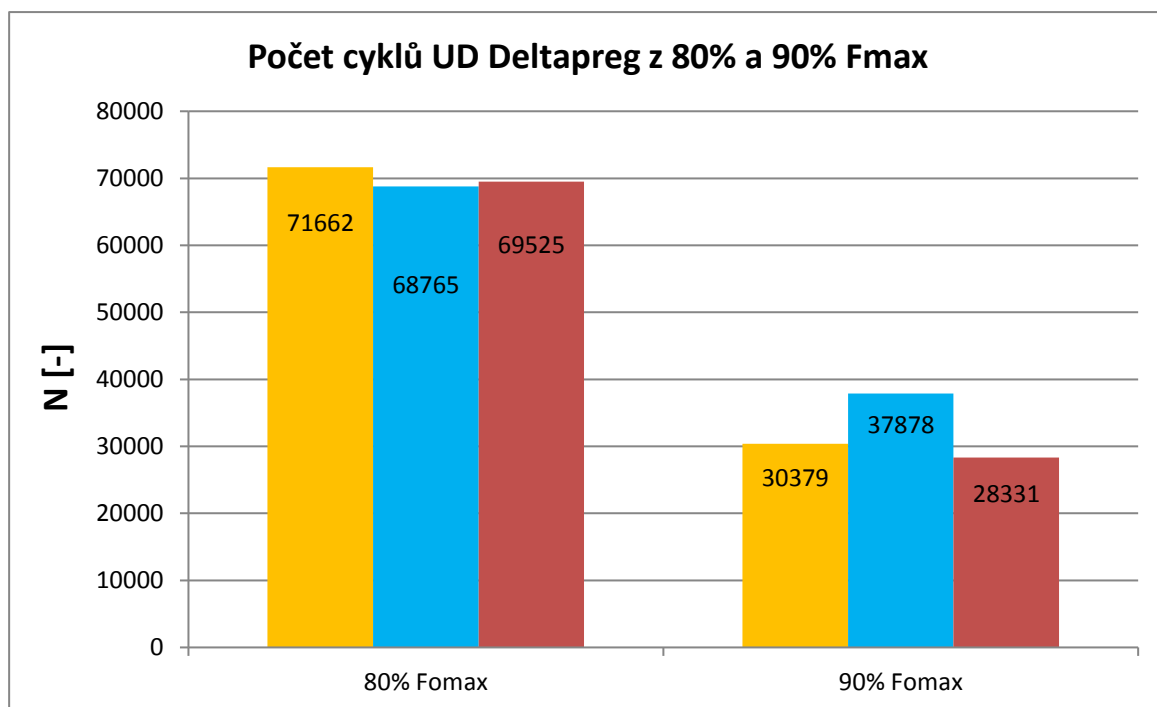
9.1.1 Výsledky cyklického zatížení zkušebního tělesa

V následujících tabulkách jsou uvedeny a vyhodnoceny výsledky tříbodové ohybové cyklické zkoušky tělesa UD Deltapreg VV430U 34%.

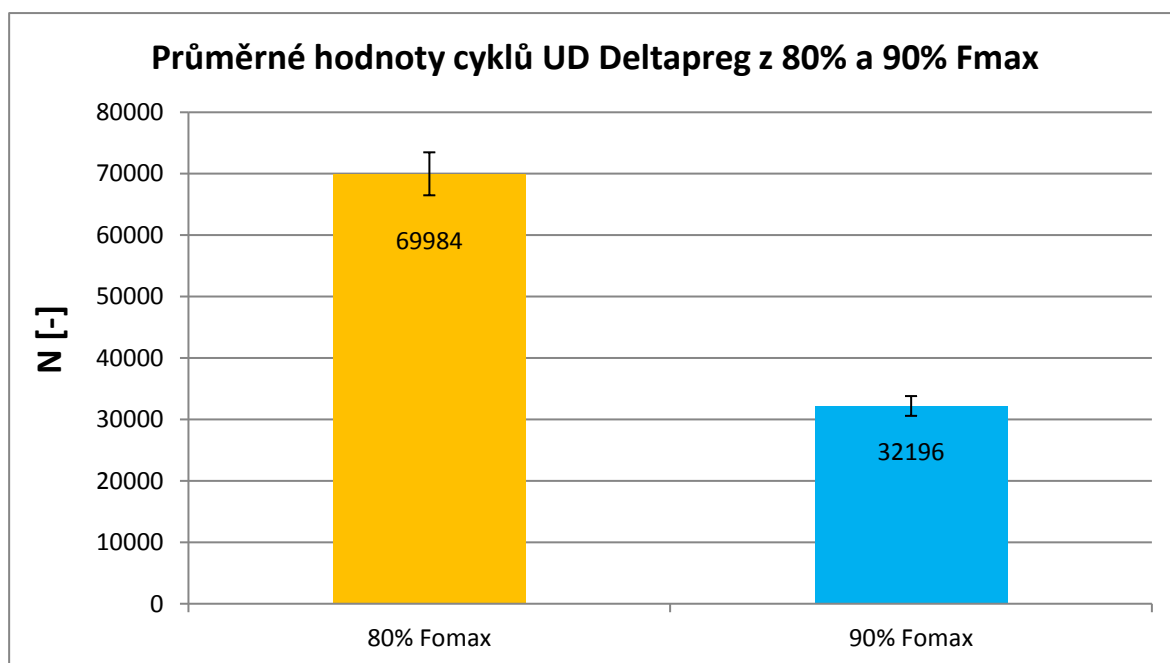
Tabulka č. 32 Počet cyklů potřebných pro porušení zkušebního tělesa UD Deltapreg VV430U 34% při 80% a 90% hladině určené z maximální síly $F_{max} = 700N$

UD DELTAPREG $F_{max} = 700 N$	Počet cyklů N	
	80% F_{max}	90% F_{max}
1.1	71662	30379
1.2	68765	37878
1.3	69525	28331
Průměrná hodnota	69984	32196
Směrodatná odchylka	1226	4104
Variační koeficient [%]	1,8	12,7

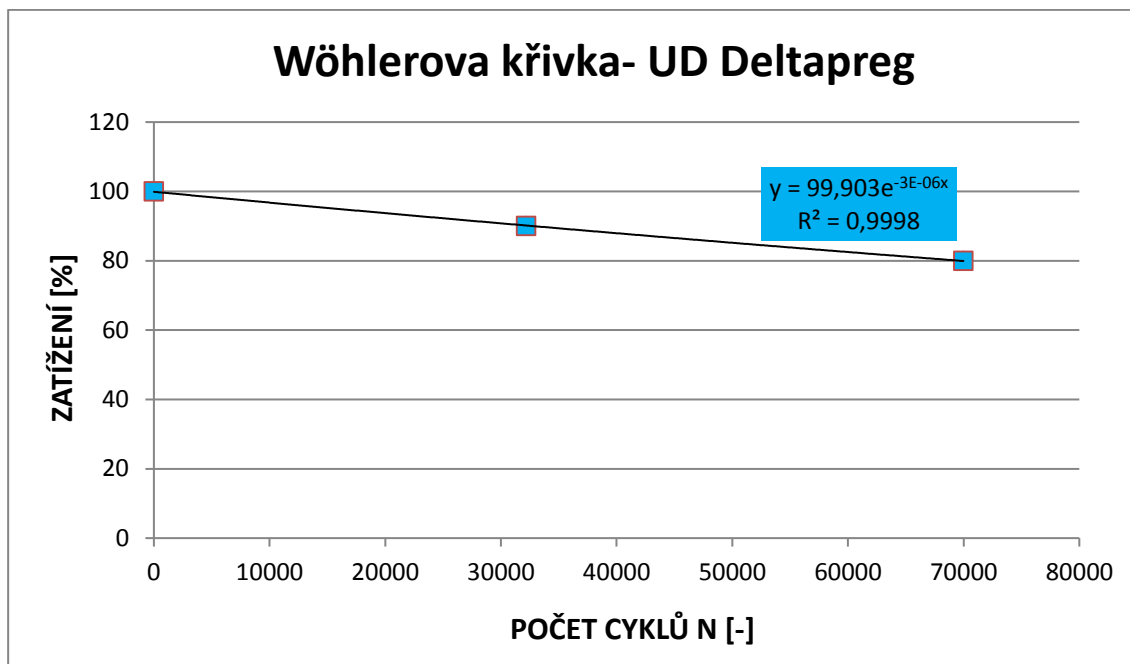
V tabulce č.32 jsou k vidění počty cyklů jednotlivých zkušebních těles UD Deltapreg VV430U 34% při hladinách síly F_{max} 80% a 90%. Průměrná hodnota hladiny 80% F_{max} vykazuje hodnotu $N= 69984$ cyklů, hladina 90% F_{max} $N= 32196$ cyklů. Tyto průměrné hodnoty byly poté použity k sestrojení Wöhlerovi křivky.



Obrázek č. 88 Jednotlivé počty cyklů UD Deltapreg VV 430U 34% z 80% a 90% Fmax



Obrázek č. 89 Průměrné hodnoty cyklů UD Deltapreg VV 430U 34% z 80% a 90% Fmax



Obrázek č. 90 Wöhlerova křivka UD Deltapreg VV430U 34%

Na grafu **č.90** je k vidění Wöhlerova křivka zkušebního tělesa UD Deltapreg VV430U 34%. Pro přesnější sestavení této křivky by bylo nutné provést více zkoušek pro více zkušebních hladin. Vyžadovalo by to, ale více zkušebních těles a více prostoru pro testování, který byl omezen kvůli velké vytíženosti zkušebního stroje.



Obrázek č. 91 Zkušební těleso UD Deltapreg VV 430U po 68765 cyklech při 80% z F_{max}

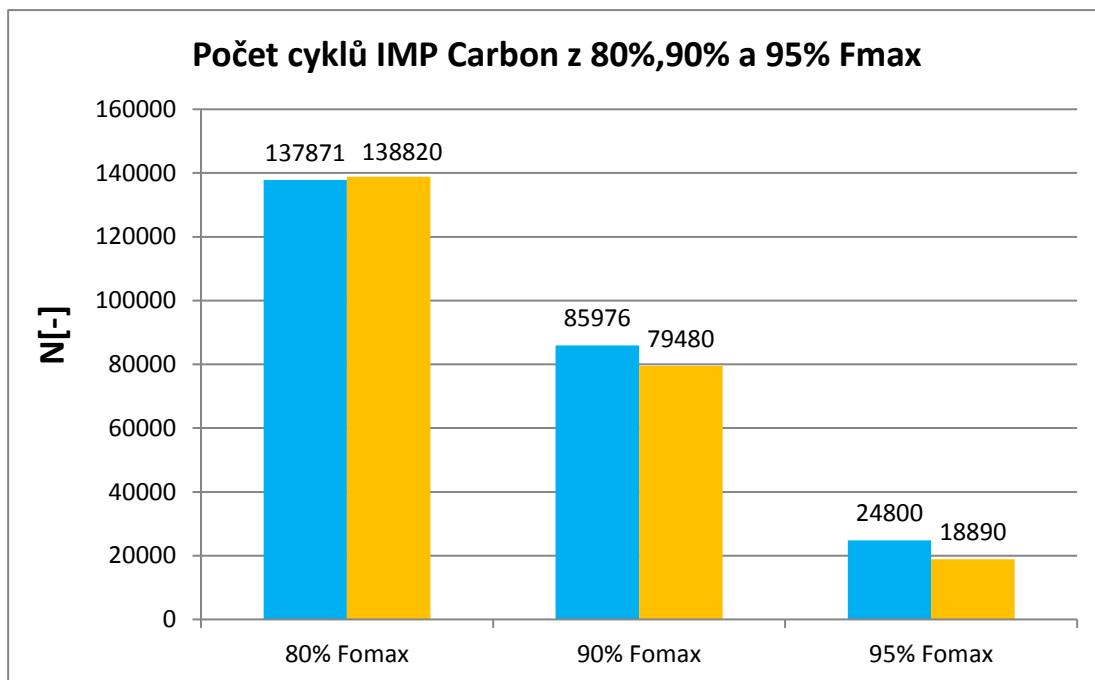
9.2 Zkušební těleso B: UD Carbon IMP GV420U

9.2.1 Výsledky cyklického zatížení zkušebního tělesa

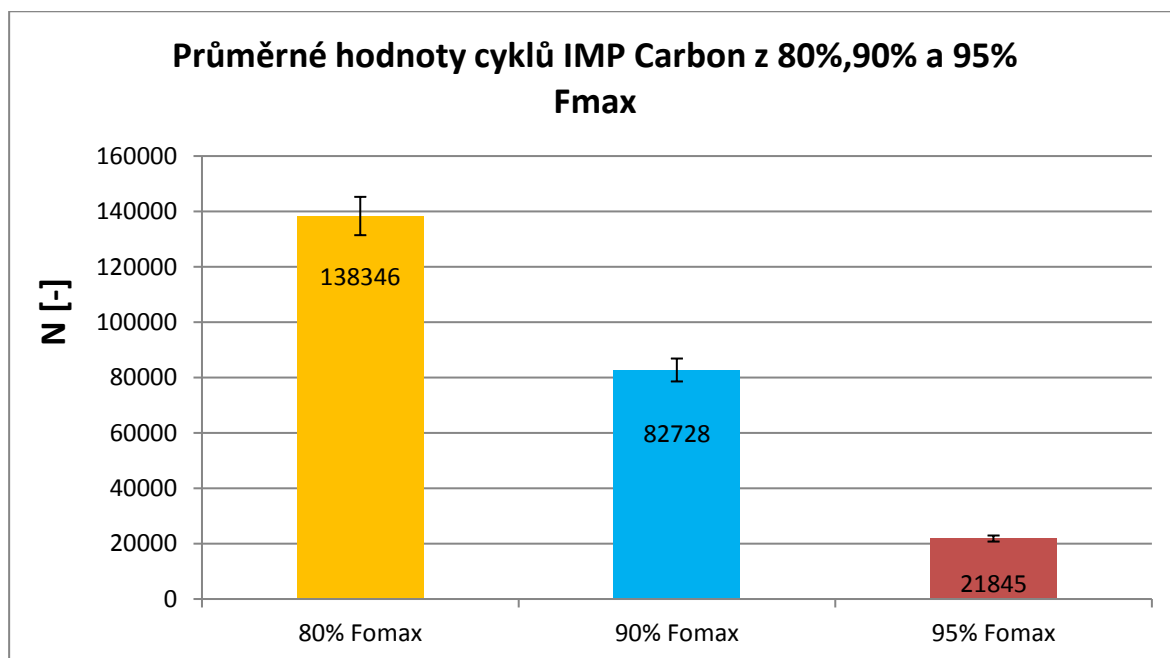
Tabulka č. 33 Počet cyklů potřebných pro porušení zkušebního tělesa UD Carbon IMP GV 420U při 80%, 90% a 95% hladině určené z maximální síly $F_{max} = 2100N$

IMP CARBON $F_{max} = 2100 N$	Počet cyklů N		
	80% F_{max}	90% F_{max}	95% F_{max}
1.1	137871	85976	24800
1.2	138820	79480	18890
Průměrná hodnota	138346	82728	21845
Směrodatná odchylka	475	3248	2955
Variační koeficient [%]	0,3	3,9	13,5

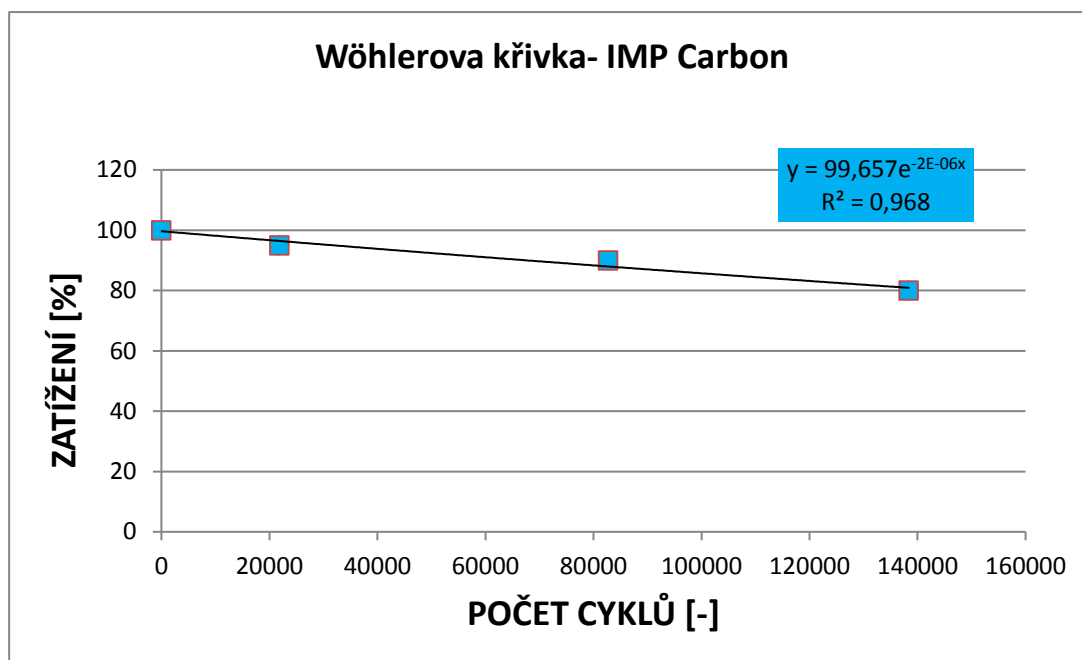
V tabulce č.33 jsou k vidění počty cyklů jednotlivých zkušebních těles UD Carbon IMP GV 420U při hladinách síly F_{max} 80%, 90% a 95%. Průměrná hodnota hladiny 80% F_{max} vykazuje hodnotu $N= 138346$ cyklů, hladina 90% F_{max} $N= 82728$ cyklů a hladina 95% $N=21845$ cyklů. Tyto průměrné hodnoty byly poté použity, k sestrojení Wöhlerovi křivky.



Obrázek č. 92 Jednotlivé počty cyklů UD Carbon IMP GV 420U



Obrázek č. 93 Průměrné hodnoty cyklů UD Carbon IMP GV420U z 80%, 90% a 95% Fmax



Obrázek č. 94 Wöhlerova křivka UD Carbon IMP GV420U



Obrázek č. 95 Zkušební těleso UD Carbon IMP GV 420U po 85976 cyklech z 90% Fmax

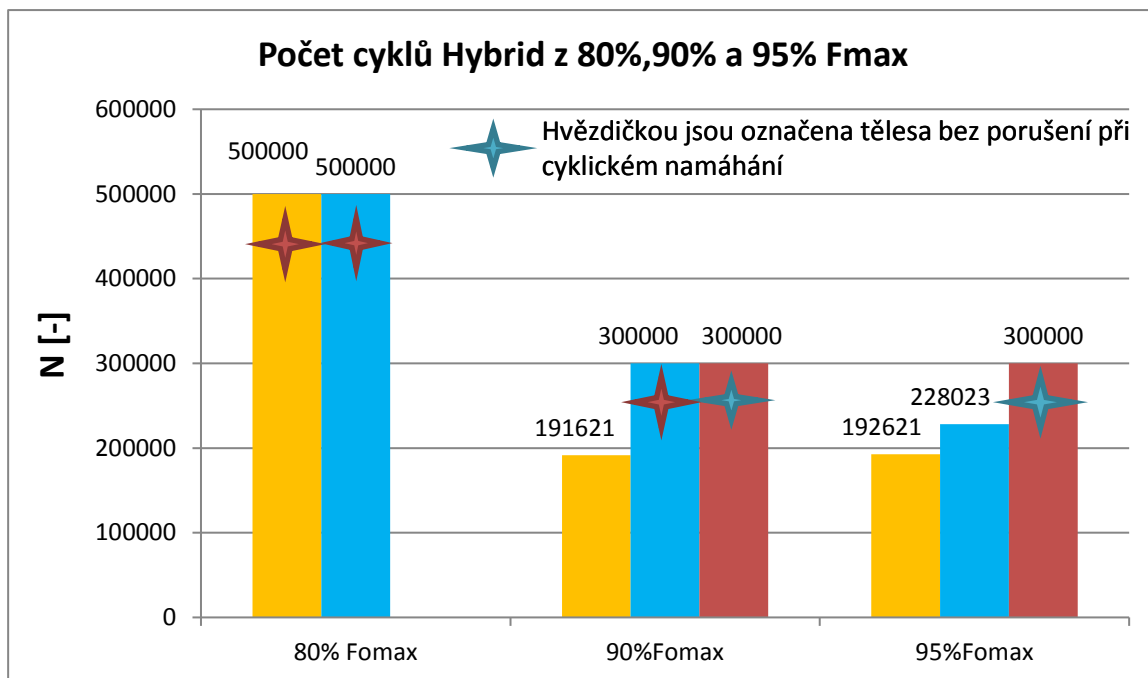
9.3 Zkušební těleso C: HYBRIDNÍ DESKA

9.3.1 Výsledky cyklického zatížení zkušebního tělesa

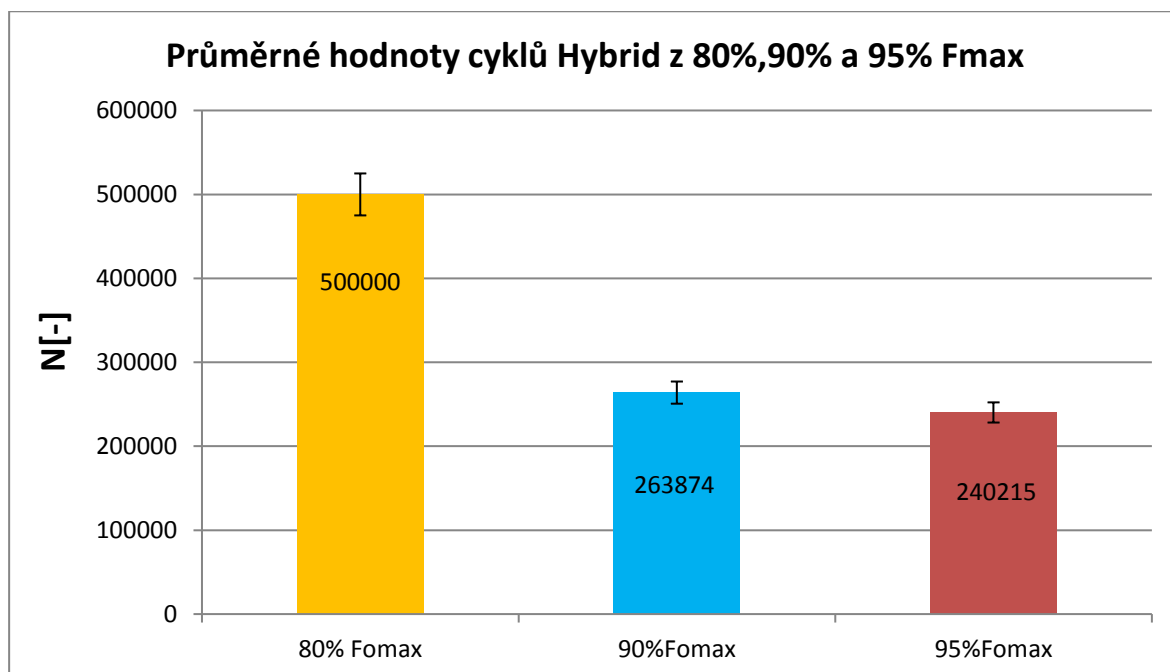
Tabulka č. 34 Počet cyklů potřebných pro porušení zkušebního tělesa Hybridní deska při 80%, 90% a 95% z F_{max}

HYBRIDNÍ DESKA $F_{max} = 1500 N$	Počet cyklů N		
	80% F_{max}	90% F_{max}	95% F_{max}
1.1	500000	191092	192621
1.2	500000	300000	228023
1.3	-	300000	300000
Průměrná hodnota	500000	263874	240215
Směrodatná odchylka	-	51090	44677
Variační koeficient [%]	-	19,4	18,6

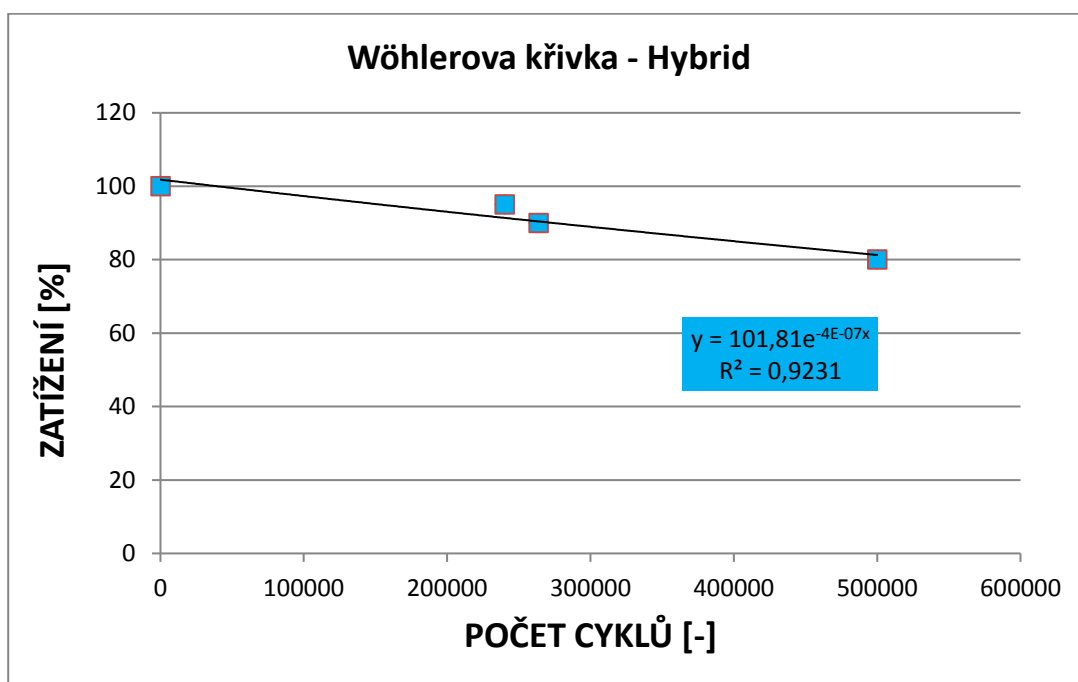
V tabulce č. 34 jsou k vidění počty cyklů jednotlivých zkušebních těles z Hybridní desky při hladinách síly F_{max} 80%, 90% a 95%. Průměrná hodnota hladiny 80% F_{max} vykazuje hodnotu $N=500000$ cyklů, hladina 90% F_{max} $N=263874$ cyklů a hladina 95% $N=240215$ cyklů. Tyto průměrné hodnoty byly poté použity, k sestrojení Wöhlerovi křivky. U hodnot $N=500000$ z 80% F_{max} a $N=300000$ z 90% a 95% F_{max} nedošlo k porušení zkušebního tělesa. Tyto neporušená tělesa byla následně podrobena statické zkoušce v ohybu pro určení zbytkové pevnosti.



Obrázek č. 96 Jednotlivé počty cyklů u zkušebního tělesa Hybridní deska z 80 %, 90% a 95% Fmax



Obrázek č. 97 Průměrné počty jednotlivých cyklů u zkušebního tělesa Hybridní deska z 80% 90% a 95% Fmax



Obrázek č. 98 Wöhlerova křivka Hybridní desky



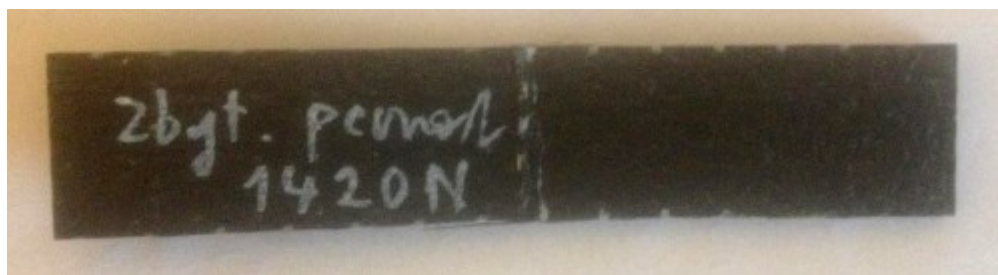
Obrázek č. 99 Zkušební těleso Hybridní deska po 228023 cyklech z 95% Fmax

9.3.2 Výsledky statických zkoušek neporušených cyklicky zatížených těles-zbytková pevnost

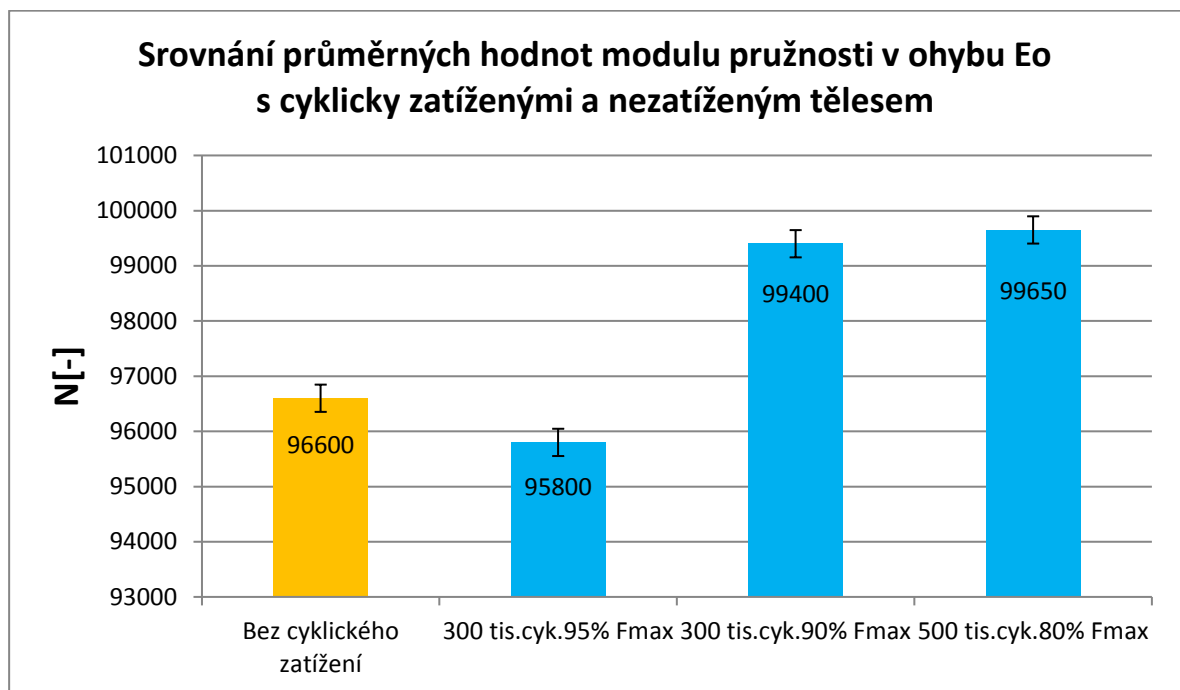
Tabulka č. 35 Výsledky zbytkové pevnosti naměřené ze statické zkoušky tříbodovým ohybem u zkušebního tělesa Hybridní deska

Hybridní deska	300 tis.cyk.95% Fmax		300 tis.cyk.90% Fmax		500 tis.cyk.80% Fmax	
	E [Mpa]	σ_{fM} [Mpa]	E [Mpa]	σ_{fM} [Mpa]	E [Mpa]	σ_{fM} [Mpa]
1.1	95800	990	100000	1071	10000	1121
1.2	-	-	98800	964	99300	1126
Průměrná hodnota	95800	990	99400	1018	99650	1124
Směrodatná odchylka	-	-	600	53,5	350	2,5
Variační koeficient [%]	-	-	0,6	5,3	0,4	0,2

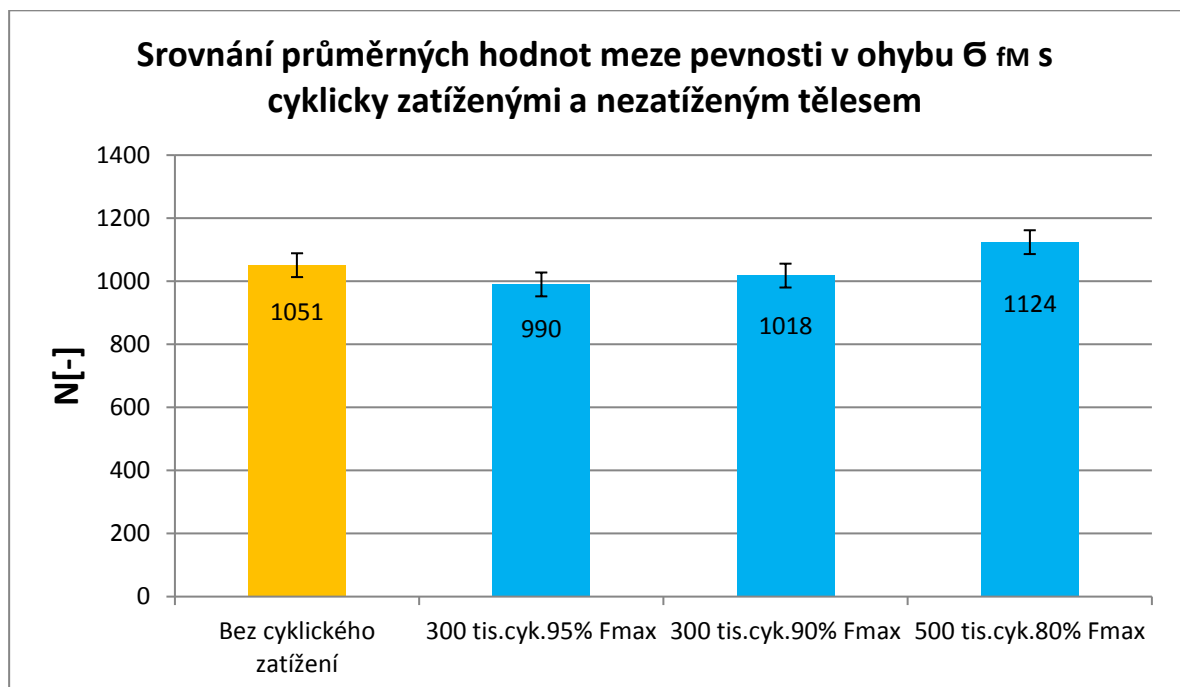
V tabulce č.35 jsou uvedeny základní mechanické hodnoty zbytkové pevnosti zkušebního tělesa Hybridní deska. Oproti našim předpokladům se hodnoty modulu pružnosti v ohybu E_o a meze pevnosti v ohybu σ_{fM} téměř nezhorsili oproti tělesům, které nebyly podrobeny cyklickým zkouškám. Naopak tyto hodnoty v některých případech dokonce vykazovali lepší hodnoty, jak je patrné v navazujících grafech, kde jsou tělesa srovnávány.



Obrázek č. 100 Zkušební těleso Hybridní deska podrobené zkoušce pro určení zbytkové pevnosti



Obrázek č. 101 Srovnání průměrných hodnot modulu pružnosti v ohybu s cyklicky zatíženými a nezatíženými tělesy u zkušebního tělesa Hybridní deska

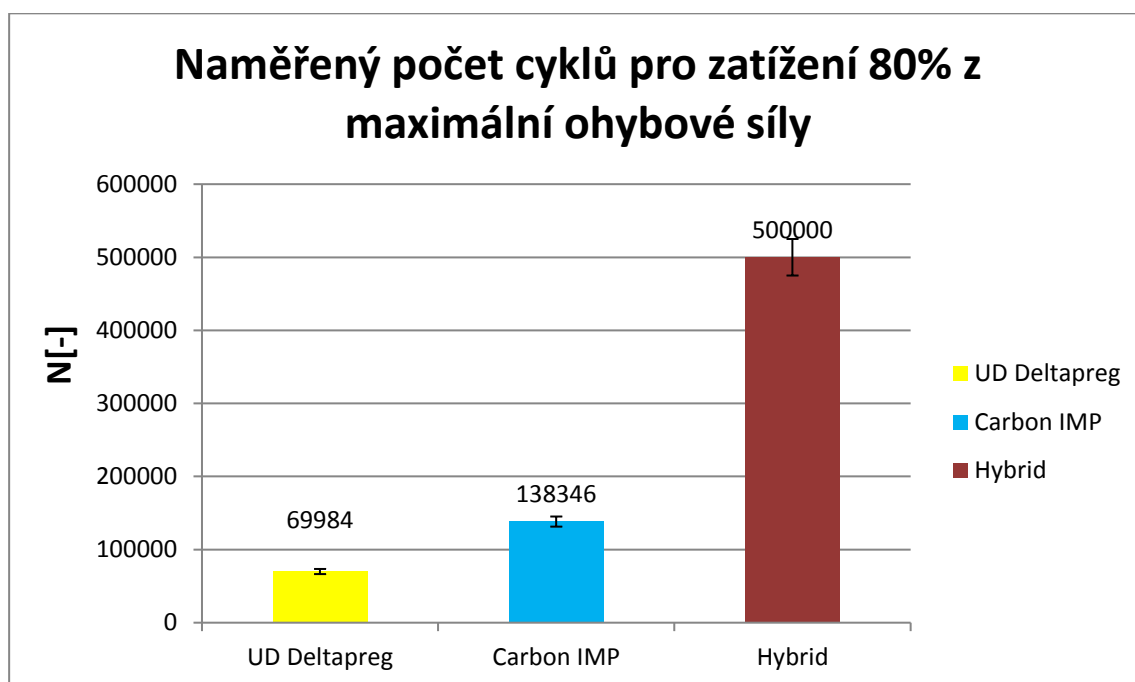


Obrázek č. 102 Srovnání průměrných hodnot meze pevnosti v ohybu s cyklicky zatíženými a nezatíženými tělesy u zkušebního tělesa Hybridní deska

9.4 Celkové srovnání počtu cyklů u jednotlivých typů zkušebních těles

V následujících tabulkách jsou uvedeny průměrné hodnoty jednotlivých počtů cyklů u zkušebních těles UD Deltapreg VV430U, UD Carbon IMP GV 420U a Hybridní desky. Tyto hodnoty jsou navzájem porovnávány pomocí sloupcových grafů.

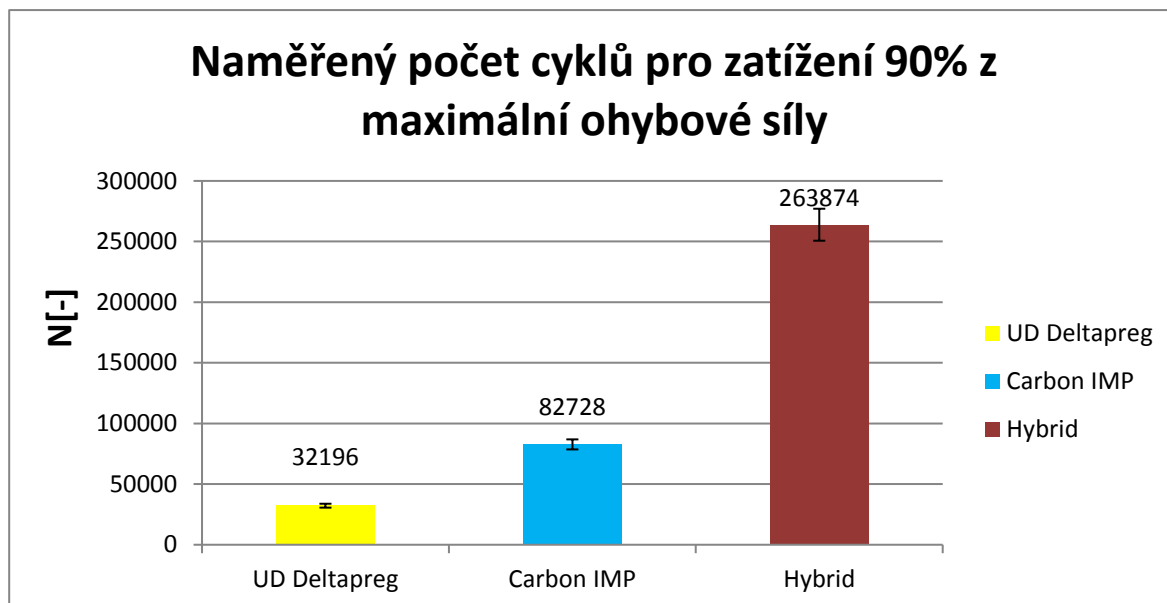
9.4.1 Srovnání počtu naměřených cyklů pro zatížení 80% z maximální ohybové síly



Obrázek č. 103 Naměřený počet cyklů pro zatížení 80% z F_{max}

Z grafu č.103 můžeme vyčíst, že nejlepší odolnost vůči cyklickému namáhání při zkušební hladině 80% z F_{max} vykazuje Hybridní deska. Rozdíl oproti ostatním zkušebním tělesům je markantní a tvoří statisíce cyklů. Jako další skončil v pořadí materiál UD Carbon IMP GV 420U, jako nejhorší se jeví materiál UD Deltapreg VV430U 34% u kterého tvoří rozdíl v porovnání s Hybridem až kolem 430000 cyklů. Samozřejmě, že u Hybridu nemusí být počet cyklů 500000 konečný. Z důvodu úspory času při získávání potřebných dat byla cyklická zkouška ukončena po dosažení této hodnoty.

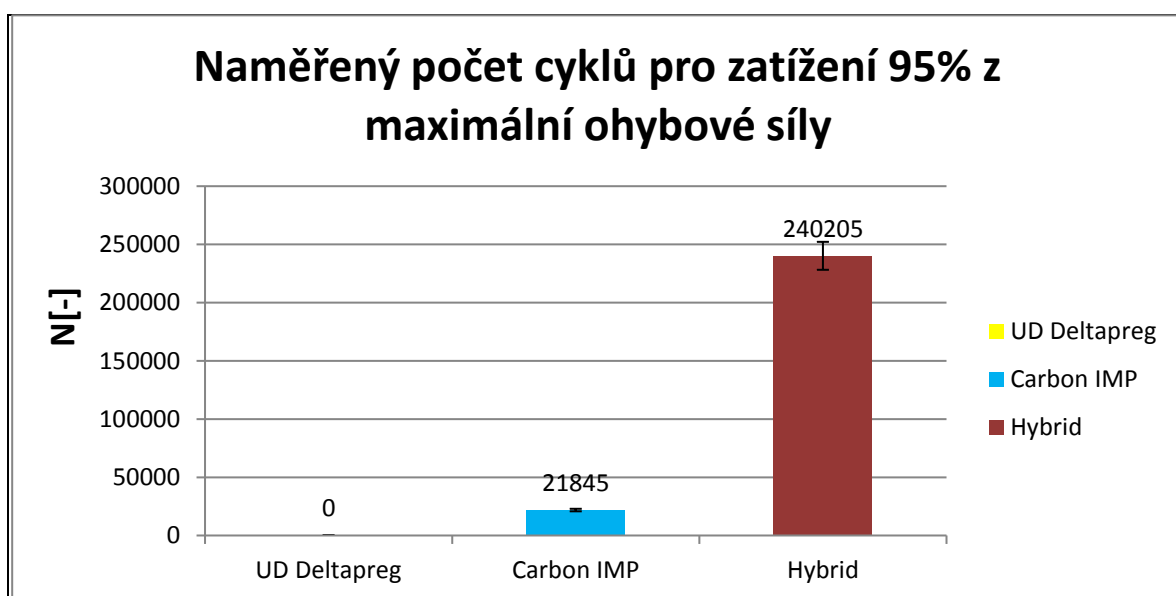
9.4.2 Srovnání počtu naměřených cyklů pro zatížení 90% z maximální ohybové síly



Obrázek č. 104 Naměřený počet cyklů pro zatížení 90% z F_{max}

Z grafu č.104 vidíme, že Hybridní deska opět vykazuje nejlepší odolnost vůči cyklickému namáhání. U všech materiálů je vidět pokles počtu cyklů potřebných k porušení tělesa. Jako nejstabilnější se jeví materiál Carbon IMP u kterého je pokles výdrže nejmenší.

9.4.3 Srovnání počtu naměřených cyklů pro zatížení 95% z maximální ohybové síly



Obrázek č. 105 Naměřený počet cyklů pro zatížení 95% z F_{max}

Z grafu č.105 můžeme vyčíst, že materiál z kterého je tvořena Hybridní deska se ustálil na hodnotě okolo 250000 cyklů potřebných k porušení tělesa. Naopak výdrž Carbonu IMP viditelně klesla až na hodnotu hranice 20000 cyklů. Těleso UD Deltapreg VV 430U nebylo pro tuto hladinu testováno z důvodů nedostatku zkušebních těles. Podle předešlého průběhu lze předpokládat, že by počet cyklů u tohoto tělesa klesl až k hranici 1000 cyklů potřebných k porušení tělesa.

Nejvyšší odolnost vůči cyklickému namáhání při zkušebních hladinách 80%, 90% a 95% z F_{max} vykazuje zkušební těleso Hybridní deska, která je schopna snést až 500000 cyklů při 80% z F_{max} . Druhou nejvyšší odolnost vykazuje materiál UD Carbon IMP GV 420U, který je schopen snášet až 130000 cyklů při zkušební hladině 80% z F_{max} . Nejnižší odolnost vůči cyklickému namáhání vykazuje materiál UD Deltapreg 34% VV430U.

9.5 Vyhodnocení zkušebních těles testovaných cyklickým zatížením s vlivem a bez vlivu klimatického zatížení

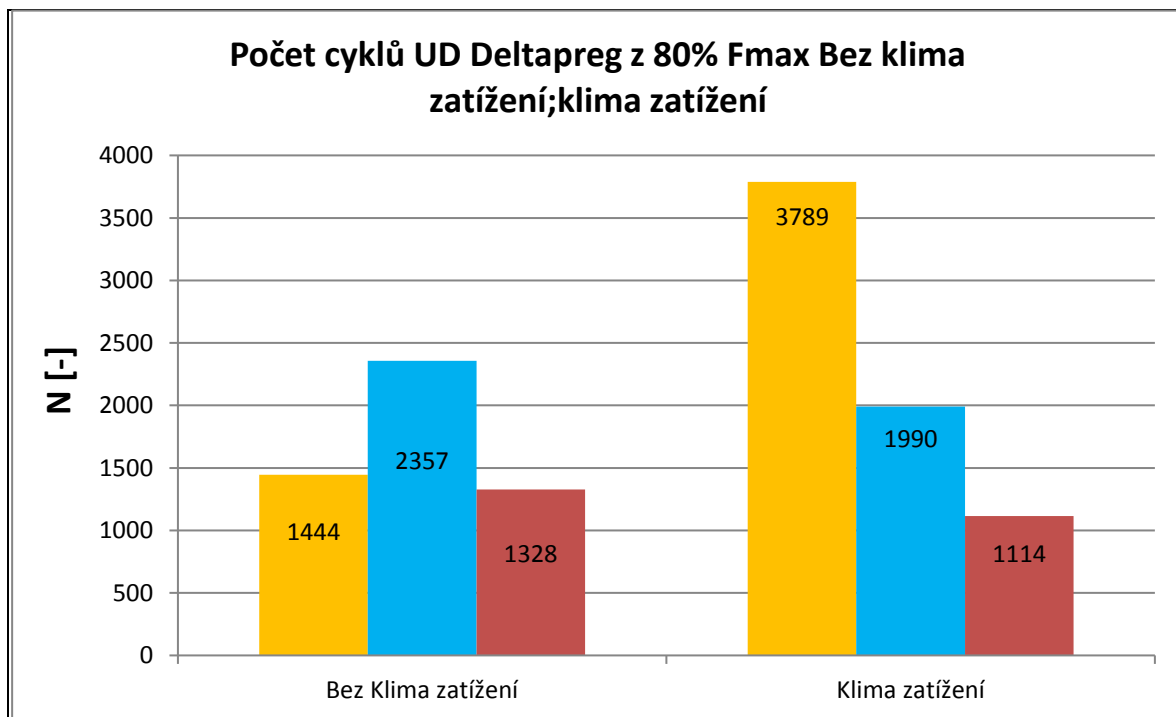
V následující tabulce a grafech můžeme vidět vyhodnocené hodnoty tělesa UD Deltapreg po cyklické zkoušce s vlivem a bez vlivu klimatického zatížení.

9.5.1 Zkušební těleso UD Deltapreg 34% VV430U při zkušební hladině 80% z F_{max}

Tabulka č. 36 Vyhodnocené počty cyklů u zkušebního tělesa UD Deltapreg 34% VV430U

UD Deltapreg $F_{max} = 1800 N$	Počet cyklů N	
	80% F_{max}	
	Bez vlivu klima. zatížení	S vlivem klima. zatížení
1.1	1444	3789
1.2	2357	990
1.3	1328	1114
Průměrná hodnota	1710	1964
Směr. odchylka	460	1291
Var.koeficient [%]	26,9	65,7

Tabulka č. 37 Srovnané počty cyklů zkušebního tělesa UD Deltapreg 34% VV430U bez klimatického zatížení a s klimatickým zatížením



Z tabulky č.37 lze vyčíst, že hodnoty cyklů před a po klima zatížení se téměř shodují až na hodnotu $N=3789$ cyklů. Tuto hodnotu, ale považujeme spíše za výjimečnou vzhledem k dalším testovaným tělesům. Nelze tedy říct, že by měl vliv klimatického zatížení zásadní vliv na odolnost vůči cyklickému zatížení. Bohužel jsme stihli otestovat jen těleso UD Deltapreg 34% VV430U, vzhledem k velké vytíženosti zkušebního stroje. Pro přesnější úsudek by mělo být provedeno více zkoušek pro všechny materiály.

ZÁVĚR

Cílem této diplomové práce bylo otestovat odolnost kompozitních materiálů na bázi prepregu proti únavovému zatížení a proti klimatickému zatížení. Zkušební tělesa byla poté navzájem srovnávána z hlediska základních mechanických vlastností, odolnosti proti únavě a odolnosti vůči klimatickému zatížení. Pro výrobu 3 typů zkušebních těles byly použity dva druhy materiálu a to UD Deltapreg 34% VV430U (materiál na bázi skelných vláken) a UD Carbon IMP GV420U (materiál na bázi uhlíkových vláken). Statické zkoušky byly provedeny tříbodovým ohybem, stejně tak i cyklické ve třech úrovních zatížení.

Nejdříve byly provedeny statické zkoušky tříbodovým ohybem pro stanovení základních mechanických vlastností cyklicky a klimaticky nezatížených těles. Z těchto zkoušek pak byla určena maximální ohybová síla, z které vyplívají úrovně zatížení, pro probíhající cyklické zkoušky. Úrovně zatížení byly stanoveny na 80%, 90% a 95% z maximální ohybové síly. Z důvodů velké časové náročnosti těchto únavových zkoušek byl počet cyklů nastaven maximálně na $N = 500\,000$. Pokud nedošlo k porušení tělesa, byla následně provedena statická zkouška tříbodovým ohybem pro zjištění zbytkové pevnosti tohoto tělesa.

Nejlepší výsledky vykazovala zkušební tělesa vyrobená z Hybridní desky, která se skládá ze 4 vrstev UD Carbonu IMP a 4 vrstev UD Deltapregu. Hybridní deska vydržela bez jakéhokoliv viditelného poškození 500 000 cyklů při zatížení 80% z maximální ohybové síly. Statická zkouška pro určení zbytkové pevnosti neprokázala téměř žádný úbytek na mechanických vlastnostech tohoto tělesa. Při zatížení 90% byl počet cyklů nastaven z důvodu úspory času maximálně na $N = 300\,000$. Dva ze tří těchto vzorků odolali bez problémů i této hodnotě, jeden z nich praskl při hodnotě $N = 191\,092$ cyklů, což můžou způsobit vady ve struktuře materiálu, nebo nesprávně dodrženy postup při výrobě. Zkušební tělesa UD Carbon IMP a UD Deltapreg neprokázaly ani z daleka tak dobrou únavovou odolnost jako Hybridní deska. UD Carbon IMP vydržel v průměru při 90% zatížení z maximální ohybové síly 82 728 cyklů, nejhůře na tom byl UD Deltapreg, který v průměru vydržel u stejné hladiny zatížení jen 32 196 cyklů. Z toho vyplývá, že každý materiál má své charakteristické hodnoty, ale společným propojením je můžou několikanásobně převyšovat.

Při vyhodnocování zkušebních těles na vliv klimatického zatížení vykazoval nejlepší výsledky před a po vystavení tělesa klimatickým změnám UD Deltapreg, jeho modul pružnosti

v ohybu klesl průměru z hodnoty 33 150 MPa na hodnotu 33 100 Mpa, další v pořadí byla Hybridní deska, jejíž modul klesl z průměrné hodnoty 62 325 Mpa na hodnotu 61 600 Mpa. Relativně nejhůř si v tomto srovnání vedl IMP Carbon jehož modul klesl z průměrné hodnoty 62 300 Mpa na hodnotu 59 300 Mpa. Téměř shodně tělesa obstála i u meze pevnosti v ohybu. Tyto hodnoty jsou však v celkovém měřítku zanedbatelné, z toho vyplývá, že tělesa vykazují téměř shodné mechanické vlastnosti před i po vystavení klimatickému zatížení.

Na závěr byla vyhodnocena zkušební tělesa testována cyklickým zatížením před a po vystavení klimatickému zatížení. Bohužel jsme pro vysokou časovou náročnost vyhodnotili jen zkušební těleso UD Deltapreg pro zkušební hladinu 80% z maximální ohybové síly. U tohoto zkušebního tělesa byl počet cyklů v průměru stejný. Paradoxně těleso vykazovalo větší odolnost vůči cyklickému namáhání po vystavení klimatickému zatížení. U tělesa bez klimatického zatížení vykazoval počet cyklů $N = 1710$ cyklů, s klimatickým zatížením $N = 1964$ cyklů. Z toho vyplývá, že klimatické změny opět nemají patrný vliv na únavovou odolnost tohoto tělesa.

Pro náročné aplikace, kde je potřeba odolnost materiálu vůči klimatickým změnám a vysokému počtu cyklů při vysokém zatížení je vhodné použít kombinaci obou námi testovaných materiálů, tedy Hybridní desku. Zároveň je třeba klást velký důraz na kvalitu a správný technologický postup výroby, jelikož ten má na životnost a mechanické vlastnosti výrobku zásadní vliv.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] EHRENSTEIN, Gottfried W. *Polymerní kompozitní materiály. V ČR 1. vyd. Praha: Scientia, 351 s. ISBN 978-80-86960-29-6, 2009.*
- [2] CAMPBELL, Flake C. *Structural composite materials.* ASM international, 2010.
- [3] 9 Interesting Facts to Know About Aircraft Composite Materials. *Best Aerospace and Aeronautical Engineering Facts and More to Learn* [online]. Dostupné z: <http://www.keyshone.com/9-interesting-facts-know-aircraft-composite-materials/>
- [4] KROČOVÁ, Blanka. *Částicové kompozity vyztužené krátkými vlákny. Brno: Vysoké učení technické, Fakulta chemická, 2012.*
- [5] De potentie van composiet | Maakindustrie – Nieuws, blogs en praktijkverhalen over de Nederlandse Maakindustrie. *Maakindustrie | Nieuws en blogs over de Maakindustrie* [online]. Dostupné z: <https://maakindustrie.nl/nieuws/de-potentie-van-composiet>
- [6] Jaromír Jágr | Jaromír Jágr | Pinterest | Hockey. *Pinterest* [online]. Dostupné z: <https://www.pinterest.com/pin/449515606534116301/>
- [7] ZIGLER, Martin. *Elektrické vlastnosti kompozitních materiálů s plnivý na bázi vodivých polymerů.* 2012.
- [8] 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>
- [9] 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>
- [10] AI-25TL (LeteckeMotory.cz). *Úvodní stránka (LeteckeMotory.cz)* [online]. Copyright © [cit. 26.04.2018]. Dostupné z: <http://www.leteckemotory.cz/motory/ai-25tl/>
- [11] WALLENBERGER, Frederick T.; WATSON, James C.; LI, Hong. PPG Industries, Inc. *Glass fibers*, 2001, 27-34.
- [12] Aviation Maintenance Technician Handbook—Airframe Volume 1 U.S. Department of Transportation FEDERAL AVIATION ADMINISTRATION Flight Standards: Aircraft Structures [online]. P.O. Box 25082, Oklahoma City, 2012 [cit. 2018-03-19].

- [13] The making of glass fiber : CompositesWorld. *CompositesWorld* [online]. Copyright © Gardner Business Media, Inc. 2018 [cit. 26.04.2018]. Dostupné z: <https://www.compositesworld.com/articles/the-making-of-glass-fiber>
- [14] NING, Fuda, et al. Additive manufacturing of carbon fiber reinforced thermoplastic composites using fused deposition modeling. *Composites Part B: Engineering*, 2015, 80: 369-378.
- [15] The discovery of carbon fibers and the practical side of phase diagrams | The American Ceramic Society. *The American Ceramic Society | The American Ceramic Society: Ceramic Engineering, Ceramic Materials and Glass Science Resources* [online]. Copyright © 2015 The American Ceramic Society [cit. 27.04.2018]. Dostupné z: <http://ceramics.org/ceramic-tech-today/the-discovery-of-carbon-fibers-and-the-practical-side-of-phase-diagrams>
- [16] Pardon Our Interruption. *Pardon Our Interruption* [online]. Dostupné z: <http://www.intelligent-aerospace.com/articles/2012/11/carbon-nexus.html>
- [17] Chemické základy moderních materiálů. *Share and Discover Knowledge on LinkedIn SlideShare* [online]. Copyright © 2018 [cit. 27.04.2018]. Dostupné z: <https://www.slideshare.net/martin.slavik/chemick-zklady-modernch-materil>
- [18] Tow pullout behavior of polymer-coated Kevlar fabric | SpringerLink. *Home - Springer* [online]. Copyright © 2017 Springer International Publishing AG. Part of [cit. 01.05.2018]. Dostupné z: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10853-010-4819-3>
- [19] *301 Moved Permanently* [online]. Copyright © [cit. 01.05.2018]. Dostupné z: https://www.ethz.ch/content/dam/ethz/special-interest/mavt/design-materials-fabrication/composite-materials-dam/Education/Manufacturing_of_Polymer_Composites/FS2017/Prepreg_Technology.pdf
- [20] VRBKA, Jan. Mechanika kompozitů. *Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky, Fakulta strojního inženýrství VUT v Brně*, 2008.
- [21] *UMI FS ČVUT | Ústav materiálového inženýrství* [online]. Copyright © [cit. 10.05.2018]. Dostupné z: http://umi.fs.cvut.cz/wp-content/uploads/2014/08/6_kompozitni-materialy.pdf
- [22] OČADLÍK, Zdeněk. Návrh a testování lepených spojů u modulu tramvaje. 2012.

- [23] 2. textile reinforced composites. *Share and Discover Knowledge on LinkedIn SlideShare* [online]. Copyright©2018 [cit. 10.05.2018]. Dostupné z: <https://www.slideshare.net/GranchBerheTseghai/2-textile-reinforced-composites-52380588>
- [24] LAŠ, V. Úvod do modelování v mechanice: mechanika kompozitních materiálů. *Učební text k předmětu Úvod do modelování v mechanice. Západočeská univerzita v Plzni.* [online]. [cit. 2014-03-25]. Dostupné z: <http://www.kme.zcu.cz/download/predmety/229-umm-6.pdf>, 2010
- [25] GIBSON, Ronald F. *Principles of composite material mechanics*. CRC press, 2016
- [26] ŠUBA, Oldřich. *Dimenzování a navrhování výrobků z polymerů*. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2010.
- [27] JOLLIVET, Thomas; PEYRAC, Catherine; LEFEBVRE, Fabien. Damage of composite materials. *Procedia Engineering*, 2013, 66: 746-758.
- [28] Mechanické vlastnosti polymerů – dynamické únavové namáhání. *Publi.cz – platforma pro multimedialní eBooky a bolimKnihy* [online]. Dostupné z: <https://publi.cz/books/180/10.html>
- [29] *Home page* [online]. Copyright ©V [cit. 11.05.2018]. Dostupné z: <http://www.cirmib.ing.unitn.it/Compositi/textbookCOMP/18.pdf>
- [30] PPT - Únava materiálu Únavový lom PowerPoint Presentation - ID:4634697. *Upload and Share PowerPoint Presentations Online - SlideServe* [online]. Copyright © 2018 Slide-ve. All rights reserved [cit. 11.05.2018]. Dostupné z: <https://www.slideserve.com/bette/nava-materi-lu-navov-lom>
- [31] SO 13003:2003 - Estonian Centre for Standardisation. *Esileht - Eesti Standardikeskus* [online]. Copyright©2017 [cit. 11.05.2018]. Dostupné z: <https://www.evs.ee/products/iso-13003-2003>
- [32] ASTM D6115 - 97(2011) Standard Test Method for Mode I Fatigue Delamination Growth Onset of Unidirectional Fiber-Reinforced Polymer Matrix Composites. *ASTM International - Standards Worldwide* [online]. Dostupné z: <https://www.astm.org/Standards/D6115.htm>

- [33] KADLEC, Martin. *Změny pevnosti a tuhosti polymerního kompozitu v závislosti na teplotě, vlhkosti a prostředí: Vliv prostředí na vlastnosti kompozitních materiálů a konstrukcí*. 22.11.2017. Ústav teoretické a aplikované mechaniky AV ČR v. v. i., Praha, 2017.
- [34] *Materials Science and Engineering introduction Chapter 15 Composites 7th ed.pdf: Chapter 15 Composites* [online]. 31.12.2015 [cit. 2018-05-11].
- [35] TACHII, Charlie. *Carbon fiber: About Carbon Fiber* [online]. 4.1.2012 [cit. 2018-05-11].
- [36] Different types of carbon fiber UD prepreg. *Talk Composites - The Forum for Advanced Composites* [online]. Dostupné z: <http://www.talkcomposites.com/24286/Different-types-of-carbon-fiber-UD-prepreg>
- [37] *Svenska Tanso AB - allt inom Grafit, EDM och Fiberkompositer* [online]. Copyright ©[cit.11.05.2018].Dostupnéz: http://www.tanso.se/wpcontent/uploads/2017/03/CatalogA_4_2017Feb.pdf

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

GF	Glass fiber
CF	Carbon fiber
PAN	Polyakrylnitrilové vlákna
HS	High strenght
HM	High modul
AF	Aramid fiber
Et	Modul pružnosti v tahu
σ_{Pt}	Pevnost v tahu
ρ	Hustota
R	Poměr únavového namáhání
N	Počet cyklů
G	Smykový modul
Tg	Teplota skelného přechodu
Lp	Délka podpěry
Eo	Modul pružnosti v ohybu
σ_{fM}	Mez pevnosti v ohybu
$F_{O_{max}}$	Maximální ohybová síla
dl	Průhyb tělesa
W	Práce
mm	Milimetr
Mpa	Megapascal
Hz	Hertz
Fstat	Statická síla

F_0	Síla kmitu
F_a	Amplituda zatěžování
F_{max}	Maximální síla při cyklickém namáhání

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek č. 1 Skladba kompozitního materiálu [3].....	13
Obrázek č. 2 Kompozitní materiál [5].....	13
Obrázek č. 3 Turbínový motor [10]	14
Obrázek č. 4 Kompozitní hůl namáhaná při střele Jaromíra Jágra [6].....	14
Obrázek č. 5 Rozdělení kompozitních materiálů	15
Obrázek č. 6 Rozdělení kompozitů z hlediska geometrie a orientace plniva a příklady struktur kompozitu: a) jednosměrně orientovaný dlouhovláknový kompozit, b) kompozit s dvousměrnou výztuží, c) částicový kompozit, d) vrstvený (sendvičový) kompozit, e) krátkovláknový kompozit s náhodně orientovanými vlákny [7].....	15
Obrázek č. 7 Prepregový díl [8]	16
Obrázek č. 8 Sendvičová struktura [9].....	16
Obrázek č. 9 Skelná vlákna [9]	18
Obrázek č. 10 Výroba skelných vláken [13].....	18
Obrázek č. 11 Karbonová vlákna v detailním pohledu [15]	19
Obrázek č. 12 Pracovní linka pro výrobu vláken PAN [16]	19
Obrázek č. 13 Uhlíková vlákna ze smol a z polyakrylonitrilu [17]	20
Obrázek č. 14 Kevlarová vlákna pod mikroskopem [18]	21
Obrázek č. 15 Základní druhy vazeb [19].....	22
Obrázek č. 16 Vliv vlastností různých druhů skleněných, uhlíkových a aramidových vláken na průběh zatěžovacího diagramu jednosměrně vyztuženého laminátu [1]....	23
Obrázek č. 17 Závislost meze pevnosti vlákna σ_{Pf} na jeho délce [20].....	24
Obrázek č. 18 Rozdělení částicových kompozitů [22].....	25
Obrázek č. 19 Diagram napětí-prodloužení vyztužených kompozitů s termosetickou a termoplastickou maticí [1].....	26
Obrázek č. 20 Rozdělení kompozitních materiálů z hlediska mechanických vlastností[22]	31
Obrázek č. 21 Matrice s jednotlivými a tkanými typy vláken[20].....	32
Obrázek č. 22 Pohled na rozloženou konstrukci laminátu[12]	33
Obrázek č. 23 Příklad vrstvení jednotlivých lamin[26]	33
Obrázek č. 24 Tvorba poškození kompozitních materiálů[1].....	34

Obrázek č. 25 Rozvoj módů poškození během průběhu zkušebního života kompozitního tělesa [1]	35
Obrázek č. 26 Únavové vlastnosti kompozitu se stejnou epoxidovou pryskyřicí a různými druhy vláken [1]	36
Obrázek č. 27 Úrovně a typy namáhání při dynamických zkouškách[28].....	37
Obrázek č. 28 Sinusové zatížení při únavové zkoušce materiálu[29].....	38
Obrázek č. 29 Možné průběhy zatížení při únavových zkouškách[29]	39
Obrázek č. 30 Únavová křivka Kevlaru a skelných vláken s epoxidovou pryskyřicí[29]	39
Obrázek č. 31 Srovnání obecné Wöhlerovi křivky pro ocel a pro polymer[28]	40
Obrázek č. 32 Charakteristiky opakovaného cyklického zatížení[30].....	41
Obrázek č. 33 Oblasti Wöhlerovi křivky[30].....	42
Obrázek č. 34 Zkušební těleso zkoušky EN ISO 13003 [31]	43
Obrázek č. 35 Vliv teploty na mez pevnosti v tahu u vybraných typů vláken[33]	44
Obrázek č. 36 Redukce průřezu a pitting při vystavení 600°C po dobu 2 hodin[33]	45
Obrázek č. 37 Závislost modulu pružnosti ve smyku na teplotě u polyesterové pryskyřice[33].....	46
Obrázek č. 38 Vzhled lomu při tahové zkoušce po vystavení vzorku vlhkému prostředí[33]	47
Obrázek č. 39 Srovnání suchého a mokrého vzorku při porušení [33].....	47
Obrázek č. 40 Porušení rozhraní vlákno/matrice [33].....	48
Obrázek č. 41 Snížená pevnost kompozitu na rozhraní v závislosti na teplotě [33].....	48
Obrázek č. 42 Zřetelné říčkování při porušení kompozitního materiálu v závislosti na nízké teplotě [33]	49
Obrázek č. 43 Rozdílné typy lomů kompozitu v závislosti na teplotě[33]	49
Obrázek č. 44 Využití kompozitů s uhlíkovými vlákny [35].....	50
Obrázek č. 45 Únavové křivky vybraných kompozitních materiálů [1].....	51
Obrázek č. 46 Výroba prepregů [1].....	52
Obrázek č. 47 Varianty výztuže u výroby prepregů [19].....	53
Obrázek č. 48 Sériová výroba prepregů [19]	53
Obrázek č. 49 UD prepreg [36].....	54
Obrázek č. 50 Kritéria ovlivňující výběr prepregů [19].....	55
Obrázek č. 51 Příklady využití prepregů [19].....	55
Obrázek č. 52 Pevnost v tahu vybraných vláken používaných při výrobě prepregů [1]	56

Obrázek č. 53 Modul pružnosti v tahu vybraných vláken používaných při výrobě prepregů [1]	56
Obrázek č. 54 Příklad uložení prepregu při vakuovém lisování [19].....	58
Obrázek č. 55 Postup výroby při vakuovém lisování [19].....	59
Obrázek č. 56 Příklad uložení desky UD Deltapreg při vakuovém lisování	60
Obrázek č. 57 Listové parabolické pružiny.....	60
Obrázek č. 58 UD Deltapreg VV430U-DT806R34%[37].....	61
Obrázek č. 59 UD Carbon IMP GV420U-DT806W-37%[37]	61
Obrázek č. 60 Zkušební těleso A1	63
Obrázek č. 61 Zkušební těleso B2.....	64
Obrázek č. 62 Zkušební těleso C3.....	64
Obrázek č. 63 Zkušební stroj ZWICK 1456 a klimatická komora.....	65
Obrázek č. 64 Uspořádání statické zkoušky v ohybu	66
Obrázek č. 65 Závislost napětí na poměrné deformaci zkušební tělesa UD Deltapreg VV430U 34%	68
Obrázek č. 66 Závislost napětí na poměrné deformaci zkušební tělesa UD Carbon GV420U.....	70
Obrázek č. 67 Závislost napětí na poměrné deformaci zkušební tělesa Hybridní deska	71
Obrázek č. 68 Srovnání průměrných hodnot modulu pružnosti v ohybu	72
Obrázek č. 69 Srovnání průměrných hodnot pevnosti v ohybu	73
Obrázek č. 70 Srovnání maximálního zatížení určené pro cyklické zkoušky.....	73
Obrázek č. 71 Závislost napětí na poměrné deformaci zkušební tělesa UD Deltapreg VV430U 34%	75
Obrázek č. 72 Závislost napětí na poměrné deformaci zkušební tělesa UD Carbon IMP 420U	77
Obrázek č. 73 Závislost napětí na poměrné deformaci zkušební tělesa Hybridní deska	78
Obrázek č. 74 Závislost napětí na poměrné deformaci zkušební tělesa UD Deltapreg VV430U 34%	80
Obrázek č. 75 Závislost napětí na poměrné deformaci zkušební tělesa UD Carbon IMP GV420U.....	81

Obrázek č. 76 Závislost napětí na poměrné deformaci zkušební tělesa Hybridní deska	83
Obrázek č. 77 Srovnání modulu pružnosti před a po klimatickém zatížení.....	84
Obrázek č. 78 Srovnání meze pevnosti před a po klimatickém zatížení.....	84
Obrázek č. 79 Závislost napětí na poměrné deformaci zkušební tělesa UD Deltapreg VV 430U 34%	86
Obrázek č. 80 Třibodové uspořádání statické zkoušky tělesa UD Deltapreg VV 430U 34%.....	86
Obrázek č. 81 Závislost napětí na poměrné deformaci zkušební tělesa UD Carbon IMP GV 420U.....	88
Obrázek č. 82 Třibodové uspořádání statické zkoušky tělesa UD Carbon IMP GV420 U	88
Obrázek č. 83 Závislost napětí na poměrné deformaci zkušební tělesa Hybridní deska	90
Obrázek č. 84 Třibodové uspořádání statické zkoušky tělesa Hybridní deska	90
Obrázek č. 85 Zkušební stroj INSTRON 8871	92
Obrázek č. 86 Třibodové uspořádání cyklické ohybové zkoušky.....	92
Obrázek č. 87 Sinusový průběh zatížení	93
Obrázek č. 88 Jednotlivé počty cyklů UD Deltapreg VV 430U 34% z 80% a 90% Fmax	97
Obrázek č. 89 Průměrné hodnoty cyklů UD Deltapreg VV 430U 34% z 80% a 90% Fmax	97
Obrázek č. 90 Wöhlerova křivka UD Deltapreg VV430U 34%.....	98
Obrázek č. 91 Zkušební těleso UD Deltapreg VV 430U po 68765 cyklech při 80% z Fmax	98
Obrázek č. 92 Jednotlivé počty cyklů UD Carbon IMP GV 420U.....	100
Obrázek č. 93 Průměrné hodnoty cyklů UD Carbon IMP GV420U z 80%, 90% a 95% Fmax	100
Obrázek č. 94 Wöhlerova křivka UD Carbon IMP GV420U	101
Obrázek č. 95 Zkušební těleso UD Carbon IMP GV 420U po 85976 cyklech z 90% Fmax	101
Obrázek č. 96 Jednotlivé počty cyklů u zkušební tělesa Hybridní deska z 80 %, 90% a 95% Fmax	103

Obrázek č. 97 Průměrné počty jednotlivých cyklů u zkušebního tělesa Hybridní deska z 80% 90% a 95% F_{max}	103
Obrázek č. 98 Wöhlerova křivka Hybridní desky.....	104
Obrázek č. 99 Zkušební těleso Hybridní deska po 228023 cyklech z 95% F_{max}	104
Obrázek č. 100 Zkušební těleso Hybridní deska podrobené zkoušce pro určení zbytkové pevnosti	105
Obrázek č. 101 Srovnání průměrných hodnot modulu pružnosti v ohybu s cyklicky zatíženými a nezatíženými tělesy u zkušebního tělesa Hybridní deska	106
Obrázek č. 102 Srovnání průměrných hodnot meze pevnosti v ohybu s cyklicky zatíženými a nezatíženými tělesy u zkušebního tělesa Hybridní deska	106
Obrázek č. 103 Naměřený počet cyklů pro zatížení 80% z F_{max}	107
Obrázek č. 104 Naměřený počet cyklů pro zatížení 90% z F_{max}	108
Obrázek č. 105 Naměřený počet cyklů pro zatížení 95% z F_{max}	108

SEZNAM TABULEK

Tabulka č. 1 Mechanické vlastnosti vybraných vláken [20].....	24
Tabulka č. 2 Porovnání viskozit termoplastových tavenin a kapalných reaktivních pryskyřic při typických zpracovatelských teplotách [1].....	26
Tabulka č. 3 Závislost mechanických vlastností epoxidové pryskyřice na teplotě [20].....	29
Tabulka č. 4 Mechanické vlastnosti vybraných termosetů [20].....	29
Tabulka č. 5 Základní mechanické vlastnosti vybraných výztuží [1].....	30
Tabulka č. 6 Základní mechanické vlastnosti vybraných matric [1].....	30
Tabulka č. 7 Velikost vad v závislosti na času, teplotě a tlaku[33]	45
Tabulka č. 8 Základní parametry matrice	62
Tabulka č. 9 Rozměry zkušební tělesa A	62
Tabulka č. 10 Rozměry zkušební tělesa B	62
Tabulka č. 11 Rozměry zkušební tělesa C	63
Tabulka č. 12 Rozměry zkušební tělesa A1	63
Tabulka č. 13 Rozměry zkušební tělesa B2	64
Tabulka č. 14 Rozměry zkušební tělesa C3	64
Tabulka č. 15 Základní parametry zkušební stroje ZWICK 1456	65
Tabulka č. 16 Základní mechanické vlastnosti zkušební tělesa UD Deltapreg VV430U 34% získané ze statické zkoušky tříbodovým ohybem.....	67
Tabulka č. 17 Základní mechanické vlastnosti zkušební tělesa UD Carbon GV420U získané ze statické zkoušky tříbodovým ohybem.....	69
Tabulka č. 18 Základní mechanické vlastnosti zkušební tělesa Hybridní deska získané ze statické zkoušky tříbodovým ohybem.....	71
Tabulka č. 19 Základní mechanické vlastnosti zkušební tělesa UD Deltapreg VV 430U 34% bez klimatického zatížení	74
Tabulka č. 20 Základní mechanické vlastnosti zkušební tělesa UD Carbon IMP GV420U bez klimatického zatížení.....	76
Tabulka č. 21 Základní mechanické vlastnosti zkušební tělesa Hybridní deska bez klimatického zatížení	78
Tabulka č. 22 Základní mechanické vlastnosti zkušební tělesa UD Deltapreg VV 430U 34% s klimatickým zatížením.....	79
Tabulka č. 23 Základní mechanické vlastnosti zkušební tělesa UD CARBON IMP GV420U s klimatickým zatížením	81

Tabulka č. 24 Základní mechanické vlastnosti zkušební tělesa Hybridní deska s klimatickým zatížením.....	82
Tabulka č. 25 Základní mechanické vlastnosti zkušební tělesa UD Deltapreg VV430U 34% získané ze statické zkoušky tříbodovým ohybem.....	85
Tabulka č. 26 Základní mechanické vlastnosti zkušební tělesa UD Carbon IMP GV420U získané ze statické zkoušky tříbodovým ohybem.....	87
Tabulka č. 27 Základní mechanické vlastnosti zkušební tělesa Hybridní deska získané ze statické zkoušky tříbodovým ohybem.....	89
Tabulka č. 28 Základní parametry zkušební stroje INSTRON 8871	91
Tabulka č. 29 Parametry zatížení cyklické zkoušky zkušebních těles z materiálu UD DELTAPREG VV430U 34%.....	94
Tabulka č. 30 Parametry zatížení cyklické zkoušky zkušebních těles z materiálu UD CARBON IMP GV 420U	94
Tabulka č. 31 Parametry zatížení cyklické zkoušky zkušebních těles HYBRIDNÍ DESKA	95
Tabulka č. 32 Počet cyklů potřebných pro porušení zkušební tělesa UD Deltapreg VV430U 34% při 80% a 90% hladině určené z maximální síly $F_{max} = 700N$	96
Tabulka č. 33 Počet cyklů potřebných pro porušení zkušební tělesa UD Carbon IMP GV 420U při 80%, 90% a 95% hladině určené z maximální síly $F_{max} = 2100N$	99
Tabulka č. 34 Počet cyklů potřebných pro porušení zkušební tělesa Hybridní deska při 80%, 90% a 95% z F_{max}	102
Tabulka č. 35 Výsledky zbytkové pevnosti naměřené ze statické zkoušky tříbodovým ohybem u zkušební tělesa Hybridní deska.....	105
Tabulka č. 36 Vyhodnocené počty cyklů u zkušební tělesa UD Deltapreg 34% VV430U.....	109
Tabulka č. 37 Srovnané počty cyklů zkušební tělesa UD Deltapreg 34% VV430U bez klimatického zatížení a s klimatickým zatížením	110

SEZNAM PŘÍLOH

- Příloha I Technický list UD Deltapreg 34% VV430U
- Příloha II Technický list UD Carbon IMP GV 420U

PŘÍLOHA P I: TECHNICKÝ LIST UD DLETAPREG 34% VV430U

SCHEDA TECNICA DI PRODOTTO/PRODUCT TECHNICAL DATA SHEET

Codice Articolo/ Material code: A-PRO1328

Rev. 1.02 - 09/10/2014

VV430U-DT806W-39 VV430U (H 124 cm)



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

Natura del formulato/ Chemical nature	Epossidico termoindurente/ 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 molding -Elevati requisiti estetici/ Good surface quality

(1) Misurata con DSC alla velocità di scansione di 20°C/min / Measured by DSC @ 20°C/min

(2) Viscosità complessa misurata a 60°C minore di 300 Poise (frequenza 10 rad/sec)/ Complex viscosity < 300 Poise @ 60°C (frequency 10 rad/sec)

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	1240 ± 5 mm (esclusa cimosa/ without selvedge)
Lunghezza standard/ Standard length	55 ± 0 m
Ordito (fili/ cm)/ Warp (ends/ cm)	5,50 ± 0,20
Trama (fili/ cm)/ Weft (picks/ cm)	6,30 ± 0,30
Peso areale fibra secca/ FAW	425 ± 20 g/m ²
Contenuto di resina/ Resin content	39 ± 3 % in peso/ by weight
Contenuto di volatili/ Volatile content	<1,0 % in peso/ by weight (3)
Spessore lamina/ Laminate thickness	0,660 mm (4)
Conservazione/ Shelf life	3 settimane @ 21°C/ 3 weeks @ 21°C 12 mesi @ -18°C/ 12 months @ -18°C

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

(4) Valore indicativo, può variare in funzione dell'eventuale fuoriuscita di resina dal laminato e dalla porosità residua/ This value depends on eventual resin bleed out and/or residual porosity in the cured laminate

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

Documento soggetto a eventuali aggiornamenti senza obbligo di comunicazione immediata/

This document may be subject to change without prior notice

Příloha P II: MATERIÁLOVÝ LIST UD CARBON IMP GV420U



N°223933

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

MATRIX PRODUCT DATA

IMP503Z

ST-130213-rev7-09/01/2015

DESCRIPTION

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

BENEFITS AND FEATURES

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

RESIN PROPERTIES

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

