

Studium únavového chování kompozitů na bázi Kordcarbon tkaniny

Bc. Jan Bednář

Diplomová práce
2016



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická
Ústav výrobního inženýrství
akademický rok: 2015/2016

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Jan Bednář**
Osobní číslo: **T14511**
Studijní program: **N3909 Procesní inženýrství**
Studijní obor: **Konstrukce technologických zařízení**
Forma studia: **prezenční**

Téma práce: **Studium únavového chování kompozitů na bázi Kordcarbon tkaniny**

Zásady pro vypracování:

- 1. Vypracování literární rešerše v oblasti uhlíkových kompozitů**
- 2. Přípravení zkušebních těles pro mechanické zkoušky**
- 3. Provedení experimentálních zkoušek**
- 4. Vyhodnocení výsledků z hlediska praktických aplikací**

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:

8. ledna 2016

Termín odevzdání diplomové práce:

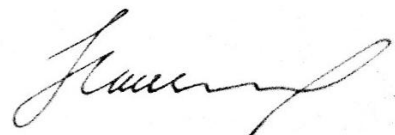
13. května 2016

Ve Zlíně dne 26. ledna 2016



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

Ve Zlíně 8.5.2016

..... Bednář Jan

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 nevdělečně 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 vzdělávacímu 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 jim 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 vláknových kompozitů na bázi Kordcarbon tkaniny a jejich porovnání se skelnými lamináty.

Teoretická část slouží jako úvod do problematiky kompozitů, používaných materiálů a výrobních technologií. Další část pak definuje únavu kompozitních materiálů a charakterizuje významné parametry únavových zkoušek. Praktická část je zaměřena na popis použitých materiálů, výrobu zkušebních těles a v neposlední řadě obsahuje vyhodnocení výsledků získaných měření mechanických a únavových vlastností zkušebních těles pomocí statické a cyklické zkoušky tříbodovým ohybem.

Klíčová slova: uhlíkové kompozity, kordcarbon, únava kompozitních materiálů, ohyb, sklolaminát

ABSTRACT

The aim of the masters thesis is to study the fatigue behavior of fiber reinforced composites based on kordcarbon fabrics and compare them with fiberglass.

The theoretical part serves as a introduction into the topic of composites, used materials and manufacturing technologies. Another section defines the fatigue of composites materials and describe the relevant parameters of fatigue tests. The practical part is focused on the description of used materials, production of specimens and ultimately includes evaluation of the results obtained from the measurement of mechanical and fatigue properties of specimens by static and cyclic tests of three-point bending.

Keywords: carbon composites, kordcarbon, fatigue of composite materials, bending, fiberglass

Touto cestou bych velmi rád poděkoval vedoucímu mé práce Ing. Milanu Žaludkovi Ph.D. za odborné vedení, cenné rady, ochotu a vynaložený čas, který mi věnoval po celou dobu tvorby této diplomové práce. Velký dík patří také Ing. Ladislavu Fojtlovi za jeho čas a pomoc při realizaci únavových zkoušek. V neposlední řadě bych chtěl poděkovat své rodině a nejbližším za jejich podporu a pomoc v průběhu celého studia.

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

OBSAH

ÚVOD	10
I TEORETICKÁ ČÁST	11
1 KOMPOZITNÍ MATERIÁLY	12
1.1 ROZDĚLENÍ KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ	13
1.2 DRUHY VÝZTUŽÍ.....	14
1.2.1 Vláknové výztuže.....	14
1.2.2 Forma výztuží.....	15
1.2.3 Částicové výztuže.....	16
1.3 DRUHY MATRIC	17
1.3.1 Nenasycené polyesterové pryskyřice	17
1.3.2 Vinylesterové pryskyřice	18
1.3.3 Epoxidové pryskyřice (EP)	18
1.3.4 Fenolické pryskyřice	18
1.4 MECHANIKA VLÁKNOVÝCH KOMPOZITŮ	19
1.4.1 Anizotropie kompozitních materiálů.....	20
2 ÚNAVA KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ	22
2.1 ÚNAVOVÉ POŠKOZENÍ KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ	23
2.2 ÚNAVOVÁ ZKOUŠKA	25
2.2.1 Režim zatížení.....	26
2.2.2 Typy zatížení.....	26
2.2.3 Zkušební frekvence	27
2.2.4 Průběh zatěžování	27
2.3 WÖHLEROVY KŘIVKY.....	27
2.4 NORMALIZOVANÉ METODY	28
3 KOMPOZITY VYZTUŽENÉ UHLÍKOVÝMI VLÁKNY	30
3.1 ÚNAVOVÉ VLASTNOSTI KOMPOZITŮ UHLÍK/EPOXI.....	30
3.2 VYUŽITÍ UHLÍKOVÝCH LAMINÁTŮ.....	32
4 TECHNOLOGIE VÝROBY KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ	34
4.1 RUČNÍ KLADENÍ.....	34
4.2 LISOVÁNÍ POMOCÍ VAKUA	34
4.3 PLOŠNÉ VÝLISKY S POLYMERNÍ MATRICÍ - SMC (SHEET MOLDING COMPOUND)	35
4.4 RTM (RESIN TRANSFER MOLDING) - LISOVÁNÍ SE VSTŘIKEM MATRICE	37
4.5 TAŽENÍ (PULTRUZE)	38
4.6 NAVÍJENÍ.....	39
II PRAKTICKÁ ČÁST	41
5 PŘÍPRAVA ZKUŠEBNÍCH TĚLES	42
5.1 POUŽITÉ KORDCARBON TKANINY PRO ZKUŠEBNÍ TĚLESA	42
5.1.1 Uhlíková tkanina A	42
5.1.2 Uhlíková tkanina B	42

5.2	VÝROBA ZKUŠEBNÍCH TĚLES Z MATERIÁLU KORDCARBON	43
5.2.1	Příprava formy	43
5.2.2	Příprava uhlíkové tkaniny	43
5.2.3	Příprava matrice	44
5.2.4	Výroba desky, technologie ruční kladení	45
5.2.5	Dělení na zkušební tělesa	46
5.3	ZKUŠEBNÍ TĚLESA ZE SKLENĚNÝCH VLÁKEN	47
5.3.1	4-axiální skelná tkanina	47
5.3.2	Skelný prepreg	49
6	MECHANICKÉ ZKOUŠKY TĚLES.....	50
6.1	STATICKÁ ZKOUŠKA OHYBEM	50
6.1.1	Naměřená data jednotlivých vzorků při statické zkoušce	51
6.2	CYKlickÉ ÚNAVOVÉ ZKOUŠKY	55
6.2.1	Nastavující parametry cyklické zkoušky	57
7	VÝSLEDKY JEDNOTLIVÝCH ZKOUŠEK.....	59
7.1	ZKUŠEBNÍ TĚLESA Z UHLÍKOVÉ TKANINY A	59
7.1.1	Výsledky statické zkoušky cyklicky zatížených těles - nízké počty cyklů	59
7.1.2	Výsledky statické zkoušky cyklicky zatížených těles - vysoké počty cyklů	61
7.2	ZKUŠEBNÍ TĚLESA Z UHLÍKOVÉ TKANINY B.....	63
7.3	SKLOLAMINÁTOVÁ ZKUŠEBNÍ TĚLESA.....	66
7.3.1	Zkušební tělesa ze 4-axiální skelné tkaniny	66
7.3.2	Zkušební tělesa ze skelného prepregu	66
7.3.3	Wöhlerovy křivky	67
8	VYHODNOCENÍ NAMĚŘENÝCH HODNOT.....	69
8.1	MATERIÁL KORDCARBON	69
8.2	SKELNÉ LAMINÁTY	70
8.3	SROVNÁNÍ UHLÍKOVÝCH KOMPOZITŮ SE SKELNÝMI LAMINÁTY	71
8.3.1	4-axiální skelná tkanina a uhlíková tkanina A	71
8.3.2	Skelný prepreg a uhlíková tkanina	72
	ZÁVĚR	75
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	77
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	80
	SEZNAM OBRÁZKŮ	82
	SEZNAM TABULEK.....	84
	SEZNAM PŘÍLOH.....	85

ÚVOD

Rozvoj kompozitních materiálů je velmi progresivní v celosvětovém měřítku. Materiály z kompozitů nacházejí uplatnění v celé řadě průmyslových odvětvích, jako jsou letectví, automobilový průmysl, vojenský průmysl, sportovní nářadí a další speciální aplikace.

Mezi nejperspektivnější materiály pro výrobu kompozitů patří jednoznačně uhlíková vlákna. Hlavními výhodami kompozitů vyztuženými uhlíkovými vlákny jsou především nízká hmotnost, vysoká pevnost, vynikající absorpční vlastnosti rázů, vysoká životnost a velmi příznivá únavová charakteristika. Výborné vlastnosti uhlíkových vláken jsou však draze vykoupeny jejich výrobní cenou. Proto navzdory svým širokým možnostem využití, zůstávají uhlíková vlákna doménou výrobků, u nichž nehraje cena zásadní roli.

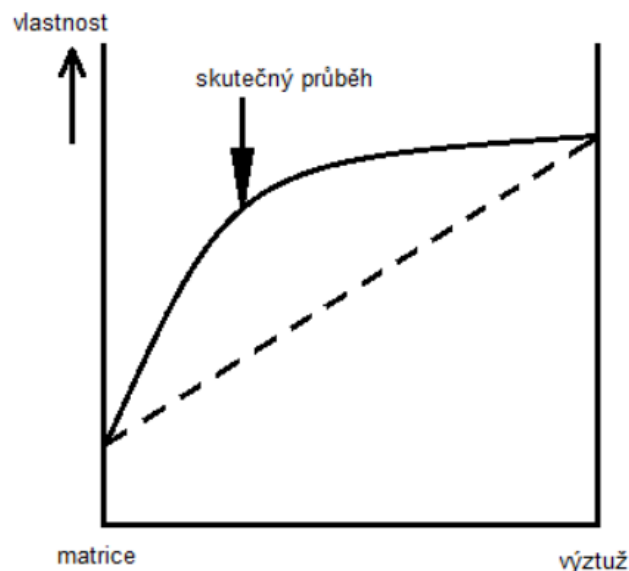
Tato práce se zabývá studiem únavového chování kompozitů na bázi Kordcarbon tkaniny, a jejím porovnáním se skelnými lamináty. Teoretická část popisuje rozdělení kompozitních materiálů, proces únavového poškození vláknových kompozitů a průběh zkoušky únavy. Část práce je také věnována únavě uhlíkových kompozitů a jejich praktickému využití. V neposlední řadě jsou zde popsány technologie výroby kompozitů. Praktická část obsahuje popis jednotlivých materiálů, které byli použity pro únavové zkoušky. Dále je zde postup výroby Kordcarbonových vzorků a charakteristika použitých mechanických zkoušek. V závěru práce jsou uvedeny výsledky jednotlivých zkoušek a jejich vyhodnocení.

Cílem této diplomové práce je prověřit odolnost uhlíkových kompozitů proti únavovému namáhání pro vysoké úrovně zatížení. Zároveň je v práci provedena komparace se skelnými lamináty.

I. TEORETICKÁ ČÁST

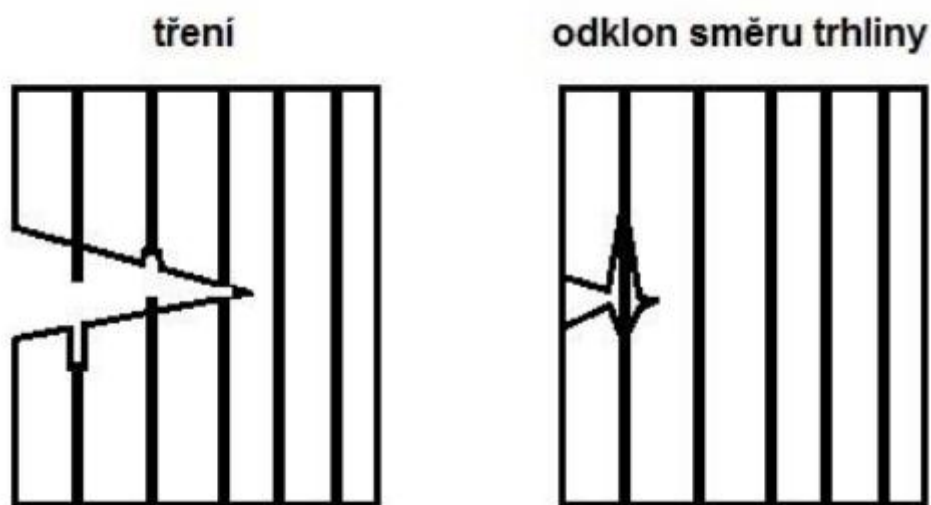
1 KOMPOZITNÍ MATERIÁLY

Kompozitní materiály jsou složeny ze dvou nebo více chemicky a fyzikálně odlišných složek (fází), které se vzájemně výrazně liší svými mechanickými, fyzikálními a chemickými vlastnostmi. Spojitá fáze kompozitu, která zastává funkci pojiva výztuže, se nazývá se matrice. Tvrdší, tužší a pevnější nespojitá fáze se nazývá výztuž. Ve srovnání s matricí jsou mechanické vlastnosti (modul pružnosti, pevnost, tvrdost atd.) výztuže obvykle výrazně lepší. Hlavním úkolem výztuže je tedy zlepšení těchto vlastností. Pro kompozitní materiály je charakteristický tzv. **synergismus**, což znamená, že vlastnosti kompozitu jsou lepší, než by odpovídalo pouhému sečtení vlastností jednotlivých složek. Synergismus je tedy velmi významný, neboť vede k získávání materiálů kvalitativně nových vlastností. [17]



Obr. 1. Synergické chování [17]

Přestože jsou matrice i vlákna samostatně velmi křehké, výsledný kompozit je charakteristický určitou mírou houževnatosti tzn. odolností proti náhlému křehkému porušení. Takové chování kompozitu je zapříčiněno tím, že šířící se lomová trhlina je bržděna na rozhraní matrice a vláken. Jednak zde dochází k odklácení směru šíření trhliny, ale také k intenzivnímu vzájemnému tření mezi matricí a vytahujícími se vlákny. Kvalita na rozhraní mezi výztuží a matricí má zásadní vliv na vlastnosti výsledného kompozitu. [17]



Obr. 2. Jevy na rozhraní matrice a výztuže při porušování kompozitu [17]

1.1 Rozdělení kompozitních materiálů

Kompozity lze rozdělit podle řady parametrů. Podle geometrického tvaru výztuže dělíme kompozity na částicové a vláknové

U **částicových** kompozitů jsou rozměry útvarů výztuže v jednotlivých směrech přibližně stejné. Vyztužující částice mohou mít různé tvary např. destičkovitý, kulovitý, tyčinkovitý nebo nepravidelný.

Naproti tomu u **vláknových** kompozitů jsou útvary výztuže (vlákna) výrazně větší v jednom směru, než v ostatních směrech. Podle délky vyztužujících vláken dělíme vláknové kompozity na kompozity s **krátkými vlákny**, u nichž je délka vláken výrazně menší ve srovnání s velikostí daného výrobku a na kompozity s **dlouhými vlákny**, u kterých je délka srovnatelná s velikostí výrobku. Pevnost a odolnost jednotlivých druhů vláknových kompozitů se liší druhem a uspořádáním použitých vláken. V kompozitních výrobcích má uspořádání vláken řadu variant. Některé z nich jsou znázorněny na obr. 3. [17]



Obr. 3. Rozdělení podle geometrického tvaru výztuže [17]

1.2 Druhy výztuží

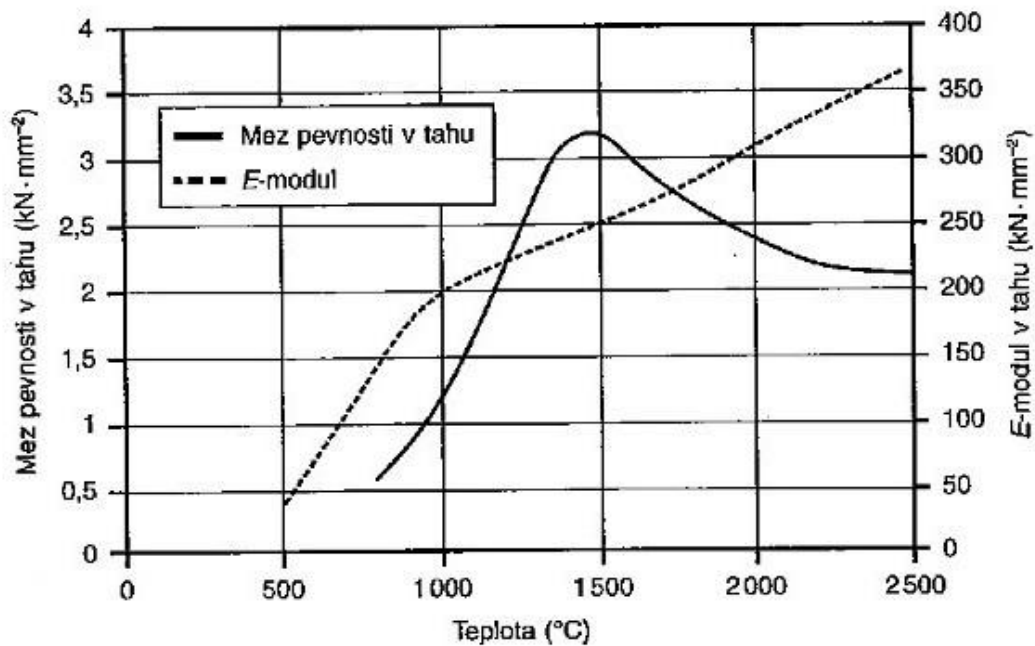
1.2.1 Vlákňové výztuže

Charakteristickou vlastností vláken je jejich výrazná anizotropie vlastností, pevnost i modul pružnosti ve směru osy je výrazně vyšší než ve směru kolmém k ose. Díky tomu mají i kompozity nejvyšší pevnost ve směru vyztužujících vláken. [17]

Uhlíkové vlákno

Uhlíkové vlákno je dlouhý tenký pramen materiálu o průměru 5 - 8 μm skládající se převážně atomů uhlíku. Většina uhlíkových vláken (90 %) je vyrobena z polyakrylonitrilových vláken - PAN. Levnější, ale zato méně kvalitní uhlíková vlákna jsou vyráběna pyrolýzou zbytků po destilaci ropy, smol, dehtu atd.

Uhlíková vlákna se dělí z praktických důvodů podle hodnot modulu pružnosti a pevnosti. Vlákna získaná při teplotách 1000 - 1500°C jsou pevnější a nazývají se vysokopevnostní uhlíková vlákna - HS (z anglického high strength). Další karbonizací těchto HS vláken při teplotě 2000 - 2800°C se získají grafitová vlákna, která mají menší pevnost v tahu, ale vysoký modul pružnosti v tahu. Tato vlákna se pak nazývají vysokomodulová vlákna - HM (z anglického high modulus). Uhlíková vlákna patří mezi nejperspektivnější materiály pro výztuže kompozitů s polymerními kovovými i keramickými maticemi. Jejich hlavní využití je v leteckém i automobilovém průmyslu, ale také třeba ve výrobě sportovního nářadí. [23], [15]



Obr. 4. Vliv teploty zpracování na E-modul a mez pevnosti v tahu uhlíkového vlákna [5]

Skleněné vlákno

Skleněná vlákna GF (glass fiber) jsou tenká vlákna s kruhovým průřezem o průměru 4 - 24 μm . Nejčastěji používaný druh skloviny pro výrobu skleněných vláken je E-sklovina a vlákna se označují jako E-vlákna. Tyto vlákna jsou výborným elektrickým izolantem a mají vysokou propustnost záření. Sklovina s vyšším obsahem SiO_2 , MgO a Al_2O_3 má až o 70 % vyšší pevnost a označuje se jako R-sklovina. Dále se také vyrábí tzv. C-sklovina, která má vysokou odolnost proti kyselinám a chemicky agresivním látkám. Modul pružnosti v tahu skleněných vláken činí přibližně jednu třetinu hodnoty oceli, pevnost v tahu je větší než u většiny organických a anorganických vláken a podstatně vyšší než u oceli. Skleněné vlákno je nejčastěji používanou výztuží ve vláknových kompozitech. [5]

Aramidové vlákno

Aramidová vlákna (AF - Aramid Fiber) jsou vlákna na bázi lineárních organických polymerů, jejichž kovalentní vazby jsou orientovány podle osy vlákna. Mezi hlavní přednosti těchto vláken patří vysoká pevnost a tuhost. [5]

1.2.2 Forma výztuží

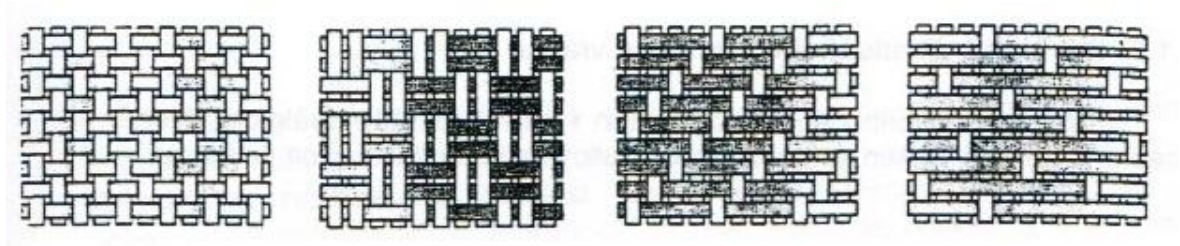
Pro většinu typů vláken jsou formy vláknových výztuží stejné a odpovídají potřebám výrobců kompozitů. Pokud jsou na kompozitní výrobky kladeny požadavky týkající se namá-

hání ve více směrech a z technologických důvodů není výhodné vrstvení jednosměrných lamin, jsou jako výztuže používány rohože, tkaniny a další. Dalším důvodem použití těchto typů výztuže je rychlejší růst tloušťky stěny výrobku, snadnější manipulace a zvýšení odolnosti proti šíření křehkých lomů. [12]

Terminologicky se používají následující formy výztuže: [12]

- **Roving** - tato forma výztuže má tvar nekonečných vláken bez krutu. Společným znakem je pramenec, který je tvořený jednotlivými vlákny a je navinutý na cívku.
- **Výztužující rohož** - je netkaná výztuž vyráběná z nasekaných rovingů, které jsou naimpregnovány pryskyřicí nebo termoplastem a tepelně slisovány do ploché kontinuální rohože. Vyrábí se v různých plošných hmotnostech a výrobky mají kvazii-zotropní vlastnosti v ploše.
- **Tkanina** - stejně jako běžné textilie se ze přízí vyrábí tkaná výztuž. Výztuž je tkána různými způsoby vazeb a má různou plošnou hmotnost. Výhodou je větší obsah vláken a tudíž vyšší tuhost a pevnost výsledného kompozitu.
- **Povrchová rohož** - má velmi jemnou strukturu a nízkou plošnou hmotnost. Slouží především pro estetické účely a tudíž nemá na mechanické vlastnosti kompozitního dílu žádný vliv.

Jednotlivé typy výztuží (roving, rohož, tkanina) a druhy vláken (sklo, kevlar, uhlík) lze kombinovat a vytvářet tak hybridní kompozity, umožňující co nejlépe vyhovět požadovaným aplikacím.



Obr. 5. Typy tkanin používaných jako výztuže v laminátech [12]

1.2.3 Částicové výztuže

Částicové výztuže se používají především pro kompozity s termoplastickými matricemi. Princip zpevnění a vyztužení částicových kompozitů je dosti odlišný na rozdíl od vláknových kompozitů. Hlavním mechanismem zvýšení tuhosti u běžných částicových kompozitů

tů je náhrada části objemu nízkomodulové matrice plnivem s vysokým modulem. Modul pružnosti roste s obsahem plniva. Rychlost růstu je dána především tvarem a velikostí částic s relativně malým efektem vlastního modulu pružnosti plniva, především u prakticky využívaných obsahů (40-50 hm.%) běžných plniv jako jsou vápenec (CaCO_3), hydroxid hlinitý (Al(OH)_3), mastek atd. Neizometrická plniva s částicemi v jiném tvaru než kulovém (Mg(OH)_2 , krátká skleněná vlákna, mastek, atd.) vykazují u vyšších obsahů plniv nad 20 hm.% výrazný efekt orientace částic plniva, který je výraznější než efekt orientace struktury polymerní matrice. Modul pružnosti těchto kompozitů roste s obsahem plniva rychleji než u kompozitů s izometrickými částicemi (Al(OH)_3 , CaCO_3). [12]

1.3 Druhy matric

Podle povahy mohou být matrice v kompozitních materiálech kovové, polymerní a keramické. **Kovové matrice** jsou charakteristické svou tvárností a houževnatostí. Mezi nejvýznamnější zástupce patří lehké slitiny hliníku, hořčíku a titan. **Keramické matrice** v kompozitech jsou lehké a také velmi tvrdé, avšak jejich nevýhodou je křehkost. Kompozity s keramickými matricemi se řadí mezi vysokoteplotní materiály. Nejčastěji používané matrice jsou však **polymerní pojiva**, a proto se dále zaměříme jejich podrobnější popis.

V technologii vláknových kompozitních materiálů se v dnešní době používá převážně matric z termosetů, v menší míře také termoplastických matric, které poskytují některé výhody ve srovnání s termosety. Nejvyužívanější matrice jsou nenasycené polyestery, vinylestery, epoxidy a fenolické pryskyřice. Nevýhodou termoplastů je jejich velká viskozita taveniny při zpracování, která je o 2 - 4 řády vyšší než u reaktoplastů. Proto dochází ke vzniku defektů při smáčení výztuže a tím ke vzniku kompozitů s nedostatečnými užitnými vlastnostmi. Pro odstranění tohoto problému je nutné používat jako vstupní surovinu termoplastem impregnovaná vlákna, což vede ke zvýšení ceny hotových kompozitních profilů. [12], [17]

1.3.1 Nenasycené polyesterové pryskyřice

Je to vlastně roztok lineárních nenasycených polyesterů, které obsahují ve svých molekulách reaktivní dvojnou $\text{C}=\text{C}$ vazbu v polymerace schopném rozpouštědle. Tímto rozpouštědlem je nejčastěji styren. Krátké oligomerní řetězce nenasycených polyesterových pryskyřic (UP - unsaturated polyesters) jsou v průběhu vytvrzování vzájemně spojovány styrenovými můstky. K tomu aby reakce probíhala technologicky přijatelnou rychlostí, je nutné

vytvrzování provádět za zvýšené teploty. Teplota vytvrzování je určena typem použitého iniciátoru, které se od sebe liší právě teplotou, při které je jejich rozpad maximální. [12]

1.3.2 Vinylesterové pryskyřice

Vinylestery (VE) jsou termosety velmi vhodné pro výrobu kompozitních výrobků vyztužených skleněnými a uhlíkovými vlákny. Výborně se hodí pro náročnější aplikace, především do agresivního chemického prostředí a také pro kompozity vystavené velkému mechanickému zatížení. V aplikacích nevyžadujících speciální elektrické vlastnosti a dlouhodobé odolávání vysokým teplotám, je možno pomocí vinylesterových pryskyřic nahradit epoxidové pryskyřice, které jsou dražší, hůře zpracovatelné a vyžadují delší dobu vytvrzování a vyšší teploty. Kompozity z vinylesterových pryskyřic mají výbornou trvanlivost v oblasti chemického průmyslu, v těžbě a zpracování ropy. Mají také vysokou pevnost, které se využívá u velkých nosných konstrukcí, např. mostů. [12], [5]

1.3.3 Epoxidové pryskyřice (EP)

Epoxidové pryskyřice jsou sloučeniny obsahující v molekule epoxidovou skupinu, která je velmi reaktivní. Díky velmi dobrým mechanickým a elektrickým vlastnostem a také velké reaktivitě se rozvinuly aplikace EP v lepidlech, lisovacích a zalévacích hmotách, pojivech pro lamináty a v lakařských pryskyřicích. Během vytvrzování se neodštěpují vedlejší produkty a důsledkem incidence mezi polymeračním smrštěním a otevřením epoxidového kruhu dochází pouze k malému polymeračnímu smrštění (2 %). Tato vlastnost je výhodná především pro výrobky s požadovanou přesností rozměrů a pro výrobu kompozitů, kde je důsledkem minimálního smrštění minimalizováno vnitřní pnutí i u velkých dílů. V porovnání s UP a VE pryskyřicemi má epoxidová pryskyřice nejlepší přilnavost k povrchově neupravené skleněné výztuži. Má také dobré elektroizolační vlastnosti v široké oblasti teplot, odolnost proti vodě roztokům alkálií, kyselinám a některým rozpouštědlům. [12]

1.3.4 Fenolické pryskyřice

Tyto termosety jsou charakteristické vysokou tvrdostí, modulem pružnosti a malou houževnatostí. Vznikají nejčastěji jako reakční produkt při reakci fenolu a formaldehydem. Fenolické pryskyřice mohou být dvoustupňové nebo jednostupňové. Dvoustupňové pryskyřice mají molární poměr formaldehyd/fenol menší než 1 a je zde přítomen kyselý katalyzátor. Tvoří asi 90 % celkové produkce fenolických pryskyřic. Jednostupňová pryskyřice má molární poměr formaldehyd/fenol větší než 1 a reakce je katalyzována alkalickým kata-

lyzátořem. Fenolické pryskyřice lze skladovat bez ztráty vlastností a schopnosti síťovat relativně dlouhou dobu ve srovnání s UP. Teplota zpracování závisí na typu metody a pohybuje se v rozmezí 150 - 210 °C. Tyto pryskyřice se využívají jako základ lepidel pro laminování dřeva, ve výrobě brzdových destiček, kompozitních profilů, brusné segmenty a další. Největší přednosti jsou její výborná termomechanická, povětrnostní a elektrická odolnost. [12]

1.4 Mechanika vláknových kompozitů

Zásadní rozdíl mezi výpočty a konstrukcí pro běžné materiály (kovy, nevyztužené plasty) a pro vlákna vyztužené kompozity spočívá v tom, že u běžných materiálů jde o hotové konstrukční materiály, zatímco u vláknových kompozitů se jedná o kombinaci z mechanického hlediska dvou velmi rozdílných složek - matrice a vlákna.

Velkou výhodou vláknových kompozitů je možnost měnit jejich pevnost a elastické vlastnosti pouze změnou prostorového uspořádání výztuže, druhu výztuže (rohož, roving, tkanina, atd.), poměru obsahu výztuže a pojiva a technologie výroby. Můžeme tedy efektivně vyrobit velkou škálu odlišných materiálů použitím stejných základních komponent. U klasických materiálů (kovy, plasty) tato možnost neexistuje nebo je omezená.

Mezi kompozitními materiály se setkáme s pojmy charakterizujícími strukturu a její symetrii a mají také velký význam pro mechanickou odezvu vláknových vyztužených kompozitů. Jednofázovou jednodílnou látku, jejíž fyzikální vlastnosti jsou ve všech bodech tělesa stejné, označujeme jako homogenní. Pokud se materiál skládá z dvou a více komponent či fází téže komponenty, označujeme jej za heterogenní.

Další důležitou charakteristikou kompozitních materiálů je symetrie jejich fyzikálních vlastností, která je zároveň odlišuje od běžných konstrukčních materiálů. Jako izotropní označujeme materiál, jehož materiálové vlastnosti jsou stejné ve všech směrech. To znamená, že všechny roviny které procházejí jedním bodem tělesa vyrobeného z tohoto materiálu jsou rovinami symetrie materiálových vlastností. Ortotropní materiál je takový, který má tři navzájem kolmé roviny symetrie materiálových vlastností. Pokud vlastnosti materiálu nevykazují žádné roviny symetrie, nazýváme jej anizotropní. Můžeme se také setkat s pojmem kvaziizotropní, což znamená že daný kompozit je možno považovat v makroskopickém měřítku za izotropní v rovině vláknité výztuže. V mikroskopickém měřítku je však tento materiál anizotropní.

Mechanika kompozitů se zpravidla dělí na mikromechaniku a makromechaniku. **Mikromechanika** se zabývá výpočtem vlastností laminy (kompozitní vrstvy) z odpovídajících vlastností jednotlivých komponent a z informací o geometrii, uspořádání, orientaci, mezifázové adhezi a objemovém zlomku výztuže. Tyto výpočty jsou významné při odlaďování materiálových vlastností a dovolují vypočítat limitující faktory při zlepšování vlastností kompozitů. Díky srovnání experimentálně zjištěných vlastností s teoretickými limitami, lze zjistit jestli daný kompozit již dosáhl svého maxima užitných vlastností nebo ještě nebyl využit jeho celý potenciál. **Makromechanika** umožňuje vypočítat vlastnosti mnohovrstevnatého kompozitu na základě znalostí vlastností jednotlivých vrstev a z údajů o počtu, tloušťce, orientaci a uspořádání lamin. Mikrostruktura je přitom zanedbávána a jednotlivé vrstvy jsou považovány za homogenní. Makromechanické výpočty se vztahují k tzv. transformované lamině nebo ke konkrétnímu tvaru dílu či kompozitního profilu a způsobu namáhání, který je převládající. Tyto výpočty také umožňují předem eliminovat takové materiálové varianty, které jsou pro řešení konkrétního problému nevhodné a navrhnout optimální počet vrstev a jejich orientaci vzhledem k působícímu namáhání.

Lomová mechanika je poměrně mladý obor, který se zabývá předpovědí efektu přítomnosti defektů na pevnost materiálů homogenních izotropních materiálů. Lomová mechanika a její aplikace se orientují spíše do mikromechaniky, kde lze pomocí lineární elastické lomové mechaniky a metod konečných prvků spočítat kritické hodnoty napětí nebo deformace nutné k dosažení mezního stavu (lomu) v požadovaném směru při zahrnutí mikrostruktury do výpočtů. [12], [5]

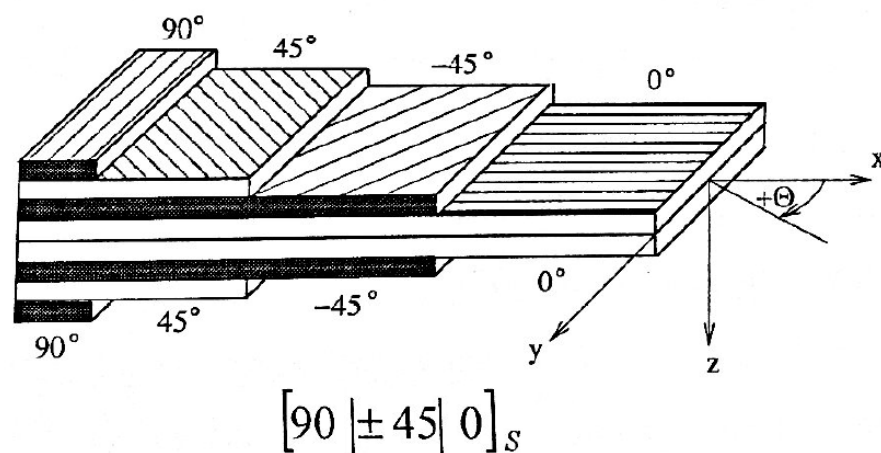
1.4.1 Anizotropie kompozitních materiálů

Kompozitní výrobky vyztužené dlouhými vlákny se skládají většinou z více vrstev, s úhlovým vrstvením několika vrstev, neboli lamin. Každá lamina obsahuje jednu výztužnou vrstvu jednosměrnou nebo vícesměrnou. Kladením několika jednotlivých vrstev lamin, které mají různou orientaci a vlastnosti, vzniká struktura, kterou nazýváme laminát. Výsledné vlastnosti laminátu jsou závislé na vlastnostech a struktuře jednotlivých lamin.

Kompozitní materiál má vždy nejvyšší tuhost a pevnost ve směru orientace vyztužujících vláken. Říkáme tedy, že vykazuje anizotropii vlastností. Laminát vzniklý kladením velmi tenkých, jednosměrně orientovaných, pryskyřicí prosycených vrstev - lamin tak, že směry vláken v sousedních vrstvách jsou odlišné, lze považovat za kvazi-izotropní. Přestože jsou

vlastnosti kompozitů směrově závislé, většinou není nutné provádět jejich měření ve všech směrech, protože lze využít symetrie, která existuje u většiny kompozitů. [12]

Vrstevnaté plošné konstrukce vyztužené dlouhými vlákny se obvykle skládají z více jednotlivých monovrstev - lamin. Samotná monovrstva obsahuje pouze jednu vrstvu výztužné tkaniny a je proto příliš tenká pro použití k jakékoli aplikaci. Vrstevnatá struktura, která vznikne kladením několika monovrstev (lamin s různou orientací) se nazývá laminát viz Obr. 6. Výsledné vlastnosti jsou závislé na parametrech struktury a vlastnostech jednotlivých lamin. [20]



Obr. 6. Příklad vrstvení jednotlivých lamin [20]

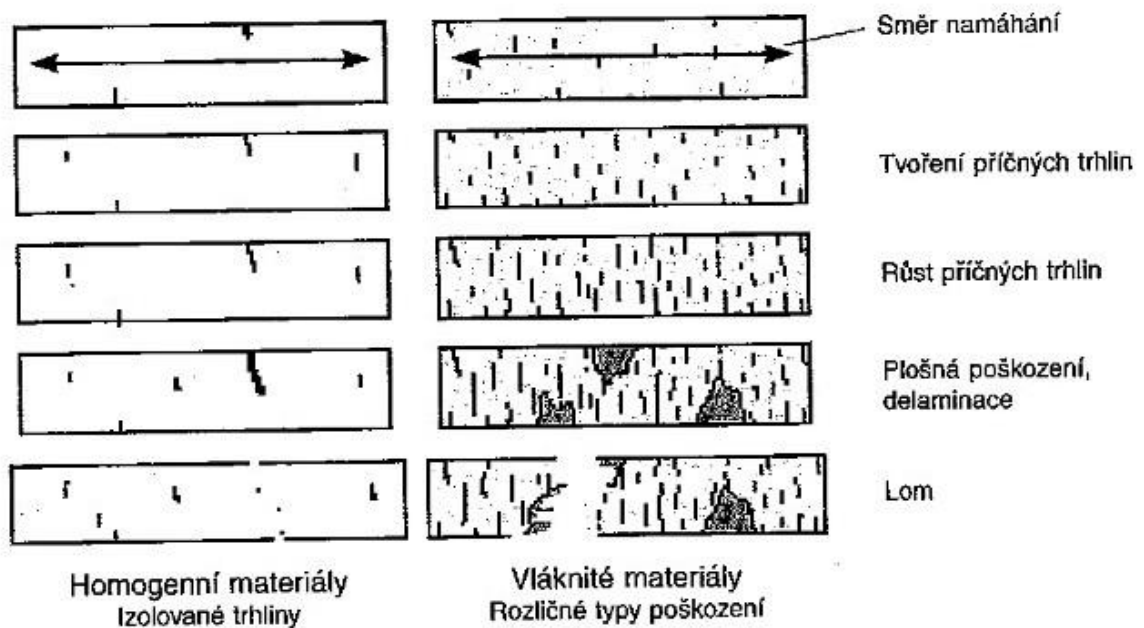
2 ÚNAVA KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ

Mezním stavem únavy materiálu rozumíme stav při kterém dojde vlivem časově proměnných zatížení k poruše funkční způsobilosti součásti. Kompozity vyztužené dlouhými vlákny umožňují optimalizaci jejich struktury s ohledem na předpokládaný způsob namáhání. V důsledku jejich mikro i makroskopicky heterogenní struktury však existuje velká rozmanitost v průběhu a způsobu porušování. U homogenních materiálů (kovy, nevyztužené plasty) se většina těchto mechanismů poškozování nevyskytuje. Konstruktorům zvyklým pracovat s izotropními materiály pak činí problémy správně pochopit a interpretovat chování kompozitů při únavovém namáhání. [5]

Klíčovým problémem, pokud jde o vláknové kompozity (FRC) s polymerní matricí je studie o jejich odolnosti vůči cyklickému namáhání. FRC nabízejí významné zlepšení oproti kovům nejen pro jejich specifickou vysokou tuhost a pevnost, ale také pro jejich odolnost proti únavě. Selhání FRC při únavovém zatížení je složitější než u kovů, díky jejich anizotropním vlastnostem v pevnosti a tuhosti. Ve skutečnosti, heterogenní a anizotropní charakter těchto kompozitů vede k tvorbě různých úrovní pnutí v materiálu, jako je praskání matrice, poškození vláken, delaminace apod. Navíc, prázdné prostory a defekty, které jsou obsaženy v matrici FRC mohou působit jako místa pro vznik zárodků únavového lomu. Obecně platí, FRC s polymerní matricí při cyklickém namáhání vykazují snížení výkonu v důsledku těchto škod. Únava v FRC postupuje hromaděním poškození v celém objemu, což vede degradaci materiálu a selhání, na rozdíl od kovů, kde dochází k šíření poškození převážně z jedné trhliny. Ačkoliv mikrotrhliny vznikají již v rané fázi únavového procesu, mohou vláknové kompozity stále odolávat zatížení až do konečného selhání. Je obecně známo, že degradace FRC skutečné výkonnosti v průběhu cyklování je spojena se snížením tuhosti kompozitního materiálu. Obecně lze pozorovat tři fáze degradace tuhosti. První počáteční prudký pokles spojený s vytvořením tzv. škody zón, která obsahuje mikroskopické trhliny a jiné formy poškození, jako je selhání na rozhraní vlákno / matrice a vytahování vláken z matrice. Druhá fáze má velmi pozvolný průběh zhoršování materiálu, který se vyznačuje postupným snižováním tuhosti. Třetí a finální etapa spojená s poruchou materiálu. Ve třetí etapě, se objevují vážnější typy poškození, jako například praskání vláken a nestabilní růst delaminace. [1], [21]

2.1 Únavové poškození kompozitních materiálů

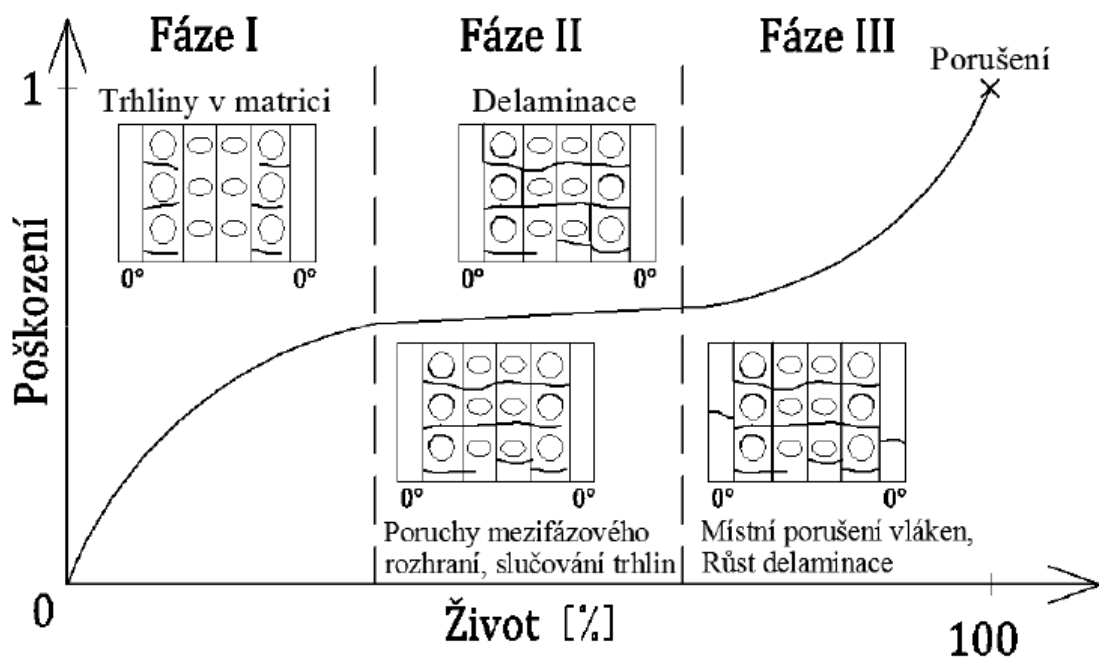
Kovové materiály vytvoří při cyklickém namáhání lokálně působící trhlinu. U vláknových kompozitů dochází při dynamickém namáhání ke vzniku a rozvoji různých typů poruch ve velkém objemu materiálu, které jednotlivě nemají tak velký význam jako trhlina v kovovém materiálu (Obr. 11). Růst trhliny u kompozitu může být zastaven sousedící pevnější složkou materiálu. [5]



Obr. 7. Průběh poškození homogenních a vláknových materiálů [5]

Typy poškození vyskytující se u vlákny vyztužených kompozitů lze dělit do těchto skupin: [5], [16]

- porušení soudržnosti vláken s matricí
- trhliny v matrici
- porušení vláken
- porušení soudržnosti jednotlivých vrstev (delaminace), především u vrstvených materiálů při postupujícím procesu únavy

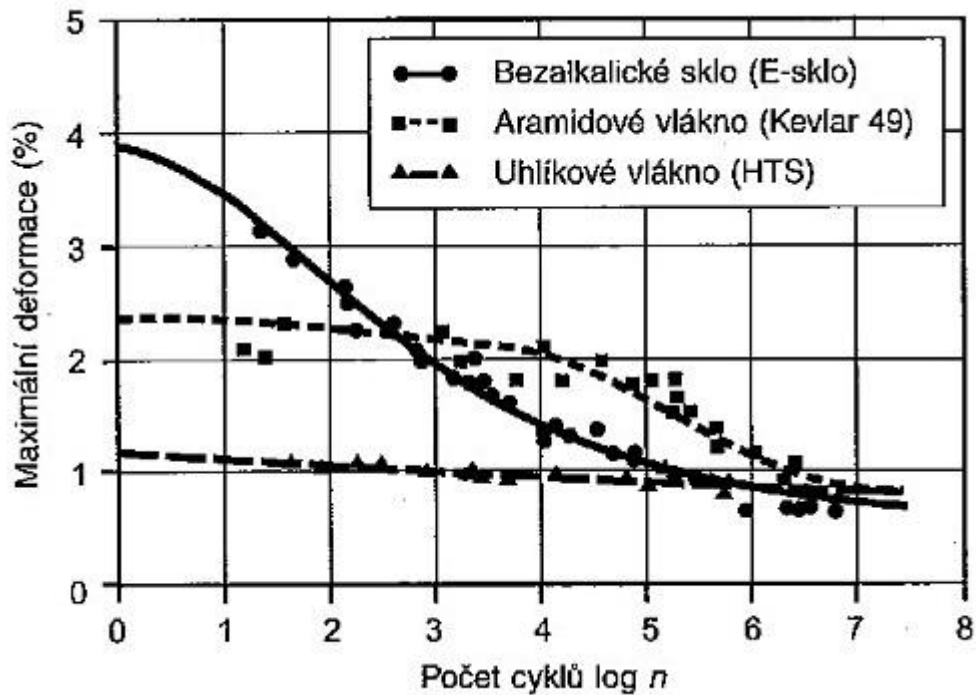


Obr. 8. Rozvoj typů poškození během života zkušebního kompozitního tělesa [16]

Rozsah a časové pořadí jednotlivých typů poškození závisí na vlastnostech jednotlivých složek kompozitu (např. tažnosti matrice, obsahu a typu vlákna, orientaci vrstev) a také na směru a druhu působících napětí (tlak, tah, smyk). Vznik a rozvoj těchto poškození probíhá za spolupůsobení ostatních typů poruch, a proto je obtížné kvalitativně ocenit vliv jednotlivých poruch a formulovat obecné zákonitosti procesu porušování.

V procesu únavového poškození dělíme poruchy na **mikroskopické** - velikost jednoho nebo několika průměrů vlákna a **makroskopické** - velikost minimálně tloušťky jedné vrstvy. Proces porušování začíná na mikroskopické úrovni a se zvětšujícím se počtem zatěžovacích cyklů vznikají stále rostoucí třidimenzionální oblasti poškození. To se projevuje snížením tuhosti materiálu. Jakmile dosáhne rozsah poškození v určitém místě kritické hodnoty, klesne zbytková pevnost či tuhost pod úroveň působícího namáhání a dojde k lomu, popřípadě ke ztrátě stability. [5]

U vlákniny vyztužených polymerů závisí únavové vlastnosti na použitých výchozích materiálech. Například epoxidové pryskyřice vykazují lepší únavové vlastnosti oproti polyesterovým. Významnější je však volba materiálu vláken. Při dynamickém zatížení mají například uhlíková vlákna mnohem větší životnost než vlákna skleněná a aramidová. [5]



Obr. 9. Srovnání únavových vlastností kompozitů - epoxidová pryskyřice a různé druhy vláken [5]

Na Obr. 13 je zobrazen průběh tažnosti v závislosti na počtu cyklů kompozitu se skleněnými aramidovými a uhlíkovými vlákny a se stejnou EP-R matricí. Lamináty vyztužené uhlíkovými vlákny ukazují že chování při dynamickém namáhání je jejich předností. [5]

Kritéria pro popsání únavového chování jsou tato: [5]

- lom či úplná porucha - Wöhlerova křivka
- pokles tuhosti a zbytková pevnost
- způsob poškození a jeho průběh

2.2 Únavová zkouška

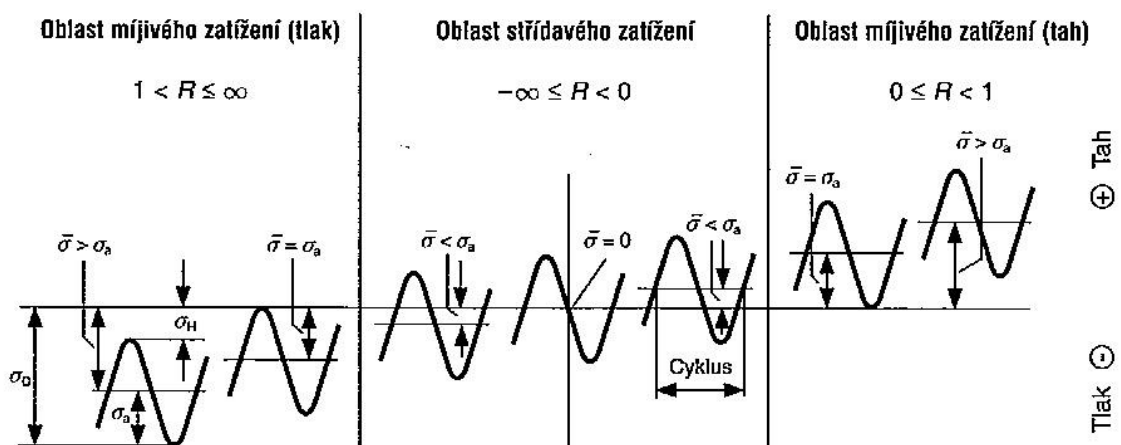
Pro zjištění mezí namáhání se při dynamickém zatížení používají dvě metody, vícestupňová a jednostupňová zkouška. U vícestupňové zkoušky se zkušební těleso nejprve zatíží na určitou úroveň deformace nebo napětí, při které nedochází v materiálu ke tvorbě trhlin či ostatním změnám. Určené hodnoty značí stav bez poškození. Následuje stupňovité zvyšování úrovně zatížení až do doby, kdy je míra poškození zjištělná. Protikladem je jednostupňová zkouška (zkouška zvyšováním zatížení pro určitým počtu cyklů), kde je vyšetřována úroveň zatížení, při které se projeví změny v materiálu vyvolané únavovým procesem. [5]

2.2.1 Režim zatížení

Únavová zkouška může probíhat jak při konstantním zatížení, tak při konstantním průhybu (v některých případech i při konstantní deformaci). V případě konstantního zatížení dojde k porušení materiálu po několika cyklech. Přestože zkouška probíhá za konstantního zatížení, s rostoucím počtem cyklů se zvětšuje deformace v důsledku nahromaděných poruch v materiálu. Použitím režimu konstantního průhybu nebo deformace dochází k plynulejšímu růstu poruch, jelikož zatížení pozvolna klesá a nedochází tedy k náhlému poškození. Během zkoušky tedy nemusí dojít k destruktivnímu porušení vzorku, protože snížením tuhosti dojde k poklesu zatížení. Z tohoto důvodu musí být stanoveny i jiné kritéria selhání, díky kterým lze považovat zkoušku za ukončenou (např. pokles tuhosti, délka trhlin). [5]

2.2.2 Typy zatížení

Kompozitní materiály se chovají jinak pod tahovým nebo tlakovým namáháním, protože zde vznikají odlišné mechanismy porušování. Při tahovém namáhání mají na únavové chování vliv především vyztužující vlákna, při tlakovém zatížení má větší význam matrice a vady materiálu. Cyklické zatížení má v mnoha případech sinusový průběh, kde se jeho hodnota mění od minima po maximum. Dynamické zkoušky mohou být provedeny ve 3 rozsazích a 7 typech zatížení. Jako charakteristika úrovně namáhání při cyklickém zatěžování se užívá poměr dolního napětí k hornímu (R). Pokud je dolní napětí tlakové (záporné znaménko) a horní napětí tahové, pak je hodnota R záporná (Obr. 16). [6], [5]



Obr. 10. Oblasti cyklického zatěžování [5]

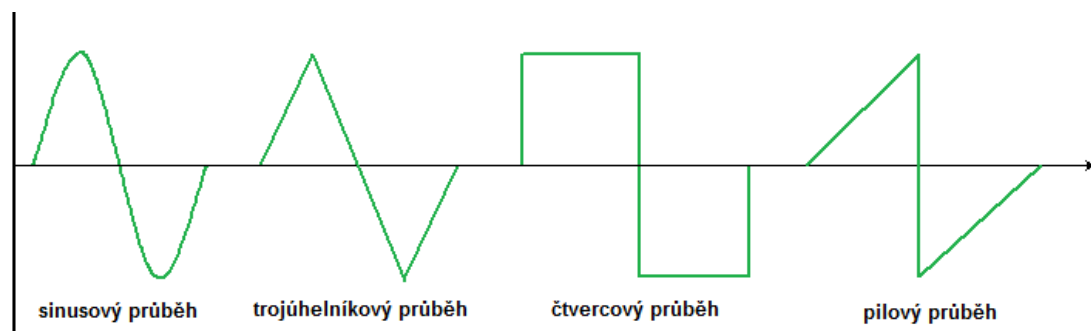
Únavová pevnost je dána největší amplitudou napětí σ_D , kterou je zkušební těleso schopno absorbovat po určitý počet cyklů. Jakmile je únavová pevnost překročena, dojde k přelomení vzorku. [5]

2.2.3 Zkušební frekvence

Omezujícím faktorem při testování únavy kompozitních materiálů je zkušební frekvence zatěžování, protože má značný vliv na únavovou životnost těchto materiálů. Frekvence se značí písmenem f a uvádí se v jednotkách Hertz (Hz) nebo počtu cyklů za sekundu. Při použití vyšších frekvencí dochází k ohřevu materiálu. Pro vyloučení ohřevu vzorku se volí frekvence 1 - 5 Hz u vyztužených termoplastů a 5 - 10 Hz u vyztužených reaktoplastů. Zkoušky únavy pro různé typy zatížení a různé deformační rychlosti probíhají při konstantní frekvenci. [22], [5]

2.2.4 Průběh zatěžování

Tvar průběhu zatěžovací křivky může také ovlivňovat únavovou životnost materiálu. Nej-používanějším je sinusový průběh zatížení, jelikož je velmi dobře definovatelný na stroji a také nejvíce odpovídá reálnému zatěžování. Mezi další průběhy patří trojúhelníkové, čtvercové (krokové) a pilové. [22]

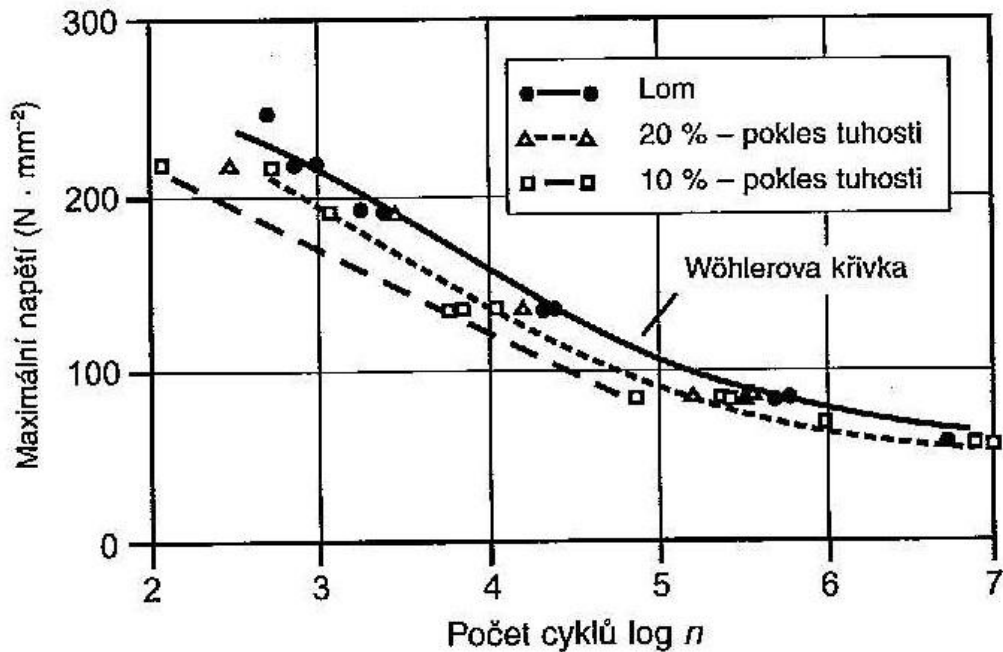


Obr. 11. Průběhy zatěžovací křivky

2.3 Wöhlerovy křivky

Wöhlerovy křivky jsou nejčastěji používané k popisu únavového chování i pro vlákna vyztužené kompozity. Kritériem únavy je lom, neboli úplné porušení zkušební vzorku. U dynamicky zatížených částí je lom, jako jediné kritérium únavy nedostatečný, protože většina plastů vyztužených vlákna vykazuje pokles tuhosti s rostoucí dobou zatížení a postupující únavou. Tento pokles tuhosti je dovolený např. u vlákna vyztužených polymerů pro konstrukční prvky, kde se může změna vlastností měnit s počtem cyklů

v jistých mezích. Pokud vezmeme jako kritérium únavy určitý pokles tuhosti (10 - 20 %) a vyneseme tyto body do Wöhlerova diagramu, získáme tak informace o časovém průběhu únavy (obr. 17). Pro určení zbytkové pevnosti je pak zkušební vzorek po určitém počtu cyklů podroben statické zkoušce. [5]



Obr. 12. Pokles tuhosti jako kritérium únavy (kompozit z epoxidové pryskyřice vyztužený uhlíkovými vlákny) [5]

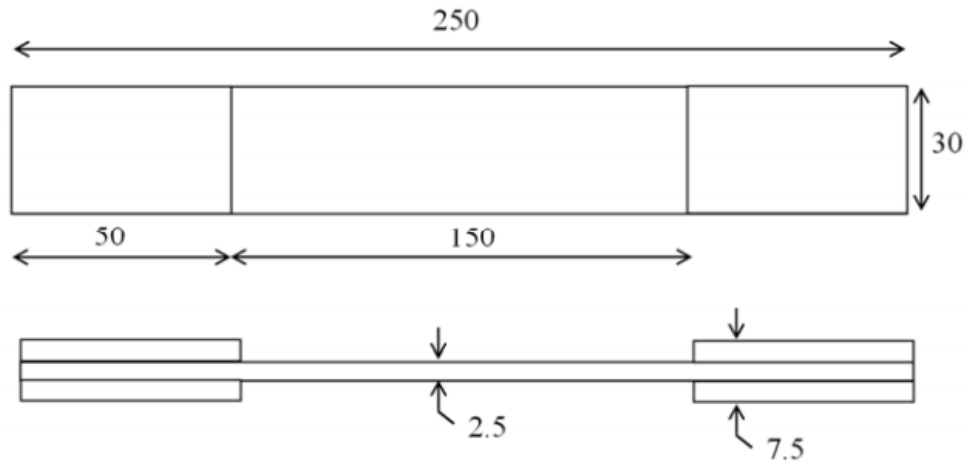
2.4 Normalizované metody

EN ISO 13003 - "Fibre Reinforced Plastics Composites - Determination of Fatigue Under Cyclic Loading Conditions" Vlákny vyztužené polymerní kompozity - stanovení únavy při podmínkách cyklického zatížení.

Nejnovější normalizovaná zkušební metoda EN ISO 13003 je jednou z mála dostupných norem pro testování únavového chování kompozitních materiálů. Tato norma uvádí obecné zásady pro únavové zkoušky, které mohou být použity, s ohledem na všechny druhy zkoušek.

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 maticí.

Tato metoda je podobná normě ISO, protože je založená na ekvivalentní statické zkoušce, ale v tomto případě je omezena pouze na režim v tahu. Norma ASTM je rozdělena na dvě metody, A a B, podle toho zda je řídicí parametr zatížení, nebo deformace. Tato norma také obsahuje užitečnou tabulku (Tabulka 1.), udávající počet vzorků, vhodný pro různé požadavky. Tato doporučení jsou rovněž dostupná pro normu EN ISO 13003. Rozměry zkušebního vzorku podle metody D3479 jsou znázorněny na Obr. 14. [8]



Obr. 13. Rozměry zkušebních vzorků podle metody D3479[8]

Tabulka 1. Doporučený počet zkušebních těles pro různé požadavky na data [8]

Data requirement	Exploratory	Materials research	Design allowables/full S-N curves
Number of specimens	6	12	24 - 30

ASTM D6115 - Standard test method for mode I fatigue delamination growth onset of unidirectional fibre reinforced polymer matrix composites [8]

3 KOMPOZITY VYZTUŽENÉ UHLÍKOVÝMI VLÁKNY

Polymery vyztužené uhlíkovými vlákny jsou vystaveny mechanickému zatížení, kvazistatickému, stejně tak únavovému namáhání, ve většině aplikacích leteckého ale i automobilového průmyslu. Vzhledem k jejich vnitřní struktuře skládající se z kontinuálních vláken a matrice jsou makroskopické vlastnosti anizotropní. Při aplikaci únavového zatížení, vzniká celá řada mechanismů poškození jako je mikropraskání matrice, mezipovrchové oddělení vlákna a matrice, příčné trhliny, praskání vláken nebo delaminace vyskytující se v mikroskopickém měřítku. Během únavového zatížení je matrice vystavena řízené únavové deformaci v důsledku vyztužení vláken. Vlákna vložené v matrici mají za následek vznik vysokých lokálních koncentrací napětí v materiálu matrice okolo vláken. V důsledku toho jsou vlastnosti kompozitů příčně ke směru vláken dokonce nižší než nevyztužené matrice. Různé deformační chování vláken a matrice může způsobit oddělení na rozhraní vlákna a matrice. Podélné mezipovrchové oddělení vlákna a matrice může být podrobněji studováno podrobněji pomocí tahových testů. Kromě závislosti složitých mechanismů poškození na aplikovaném zatížení, mohou být vlastnosti kompozitních materiálů ovlivňovány také množstvím vláken. Je dobře známo, že větší objemový podíl vláken zlepšuje mechanické vlastnosti, jako je pevnost v tahu a tuhost ve směru vláken. [2]

3.1 Únavové vlastnosti kompozitů uhlík/epoxi

Uhlíkové lamináty se vyznačují výbornou odolností proti únavě. Nejlepší kombinace je epoxidová matrice/uhlíková vlákna. Uhlíkové kompozity s epoxidovou pryskyřicí jsou pro cyklická a proměnlivá namáhání velmi vhodným materiálem, neboť jim dobře odolávají. Mez únavy v míjivém tahu těchto kompozitů je většinou asi 70 % statické pevnosti v tahu, mez pevnosti ve střídavém tahu/tlaku je asi 35 % statické pevnosti v tahu. Protože mají tyto kompozity i velmi příznivý poměr pevnosti a tuhosti k vlastní hmotnosti, je jejich použití velmi výhodné pro letecké konstrukce.

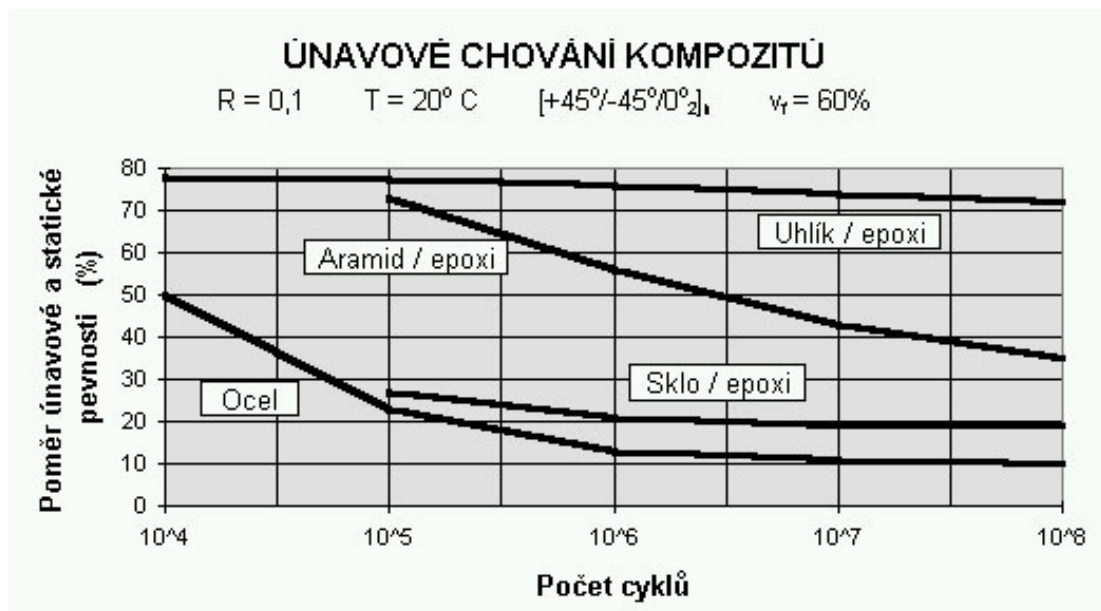
Výhodou je velká únavová pevnost vzhledem k pevnosti statické a její pomalý pokles s počtem cyklů do lomu, vysoká zbytková pevnost, malá citlivost na vruby, malá citlivost na frekvenci zatěžování, a také malý pokles tuhosti s provedeným počtem zatěžovacích kmitů. Další nezanedbatelnou výhodou je možnost dosáhnout vhodným kladením vrstev požadovaných hodnot tuhosti, pevnosti Poissonova čísla nebo předpětí. Mezi nevýhody patří zhoršená odolnost při tlakovém zatížení, citlivost na otažení a koroze při styku se slitinami Al a ocelí. Významnou nevýhodou je absorpce vlhkosti a následné zhoršení

mechanických vlastností. Vhodným provedením konstrukce lze však tyto nevýhody překonat. [19]

Oproti kovovým materiálům jsou Wöhlerovy křivky uhlíkových laminátů velmi ploché, neexistuje mez únavy. V souvislosti s σ -N křivkami je nutno rozlišovat vysokocyklovou a nízkocyklovou únavu. První termín identifikuje situaci dlouhého únavového života, tj. amplituda napětí je dostatečně nízká a tedy plastická deformace není dominující pro chování materiálu. Vysokocyklová únava začíná od počtu cyklů 10^2 - 10^4 .

Kromě polohy Wöhlerových křivek, které stanovují počet cyklů mající za následek porušení, bývá pro určité napětí a pro určitý počet cyklů stanovována zbytková životnost, která vychází z teorie kumulace poškození. Životnost je vyčerpána, jestliže součet jednotlivých poškození je větší než 1. [14]

Výhody použití uhlíkového kompozitu spočívají zejména v nízké hmotnosti, vysoké pevnosti, vynikajících absorpčních vlastnostech rázů, vysoké životnosti a velmi příznivá únavová charakteristika. Srovnání únavového chování uhlíkových kompozitů s ostatními materiály je znázorněno na obrázku 14. [4]



Obr. 14. Únavové chování kompozitů - srovnání [4]

3.2 Využití uhlíkových laminátů

Letectví

V civilním a vojenském letectví se využívají především uhlíkové kompozity vláknopryskyřice pro výrobu strukturních elementů, jako jsou například křídélka, směrovky, součásti trupu, nosné díly podlah a výztuhy sedadel. Díky schopnosti tlumit vibrace jsou tyto kompozity využívány i u konstrukce vrtulníků (letové listy). Díky nízké hmotnosti a výborným mechanickým vlastnostem, jako je vysoká únavová pevnost a vysoký modul pružnosti patří uhlíková vlákna k nejpoužívanější výztuži pro kompozity používané v letectví.

Například u Boeingu 787 Dreamliner tvoří uhlíkové materiály většinu trupu, křídla a ocas.



Obr. 15. Podíl uhlíkových materiálů na Boeingu 787 Dreamliner [18]

K masivnímu využití uhlíkových kompozitů dochází také v oblasti sportovního ultralehkého létání.

Automobilový průmysl

Uhlíková vlákna se používají např. na nárazníky a části karoserií. Karbonem jsou také pořízeny některé nádrže motorek atd. Nejvíce se karbon používá u sportovních závodních aut, které jsou z velké části vyrobeny z karbonu. Díky tomu jsou velice lehká a při nárazu je tento materiál schopen pohltit obrovskou část nárazové energie



Obr. 16. Karbonový nárazník [7]

Cyklistika

Ve velké míře se v současné době využívají karbonové kompozity při výrobě rámu jízdních kol i ostatních komponent a to zejména z důvodu jejich vlastností. Obecnou výhodou kompozitních materiálů karbonového nevyjímaje je vysoká pevnost, nízká hmotnost a velice příznivý průběh únavové křivky. Karbonové rámy díky tomu mají vysokou trvanlivost, neboť v důsledku namáhání stárnou velice pomalu. Majitelé karbonových rámu také mohou ocenit určitou schopnost karbonu tlumit vibrace a nárazy, protože materiál vrácí jen část vložené energie. Jízda na kole s karbonovým rámem by tak měla být pohodlnější než u rámu hliníkového. [13]

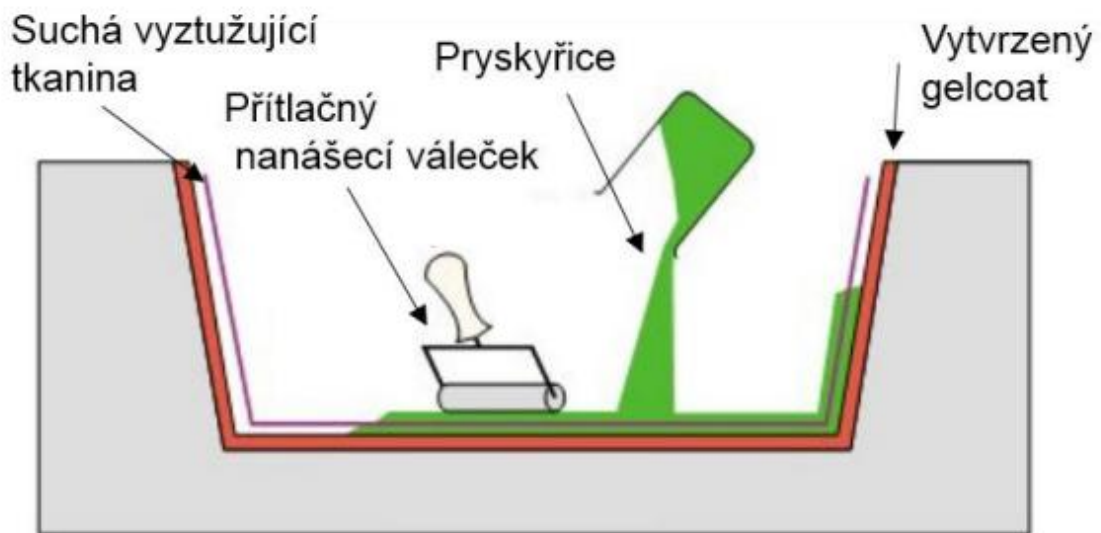


Obr. 17. Karbonový rám [13]

4 TECHNOLOGIE VÝROBY KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ

4.1 Ruční kladení

Ruční kladení je nejstarší a nejjednodušší technologie. Jedná se o metodu, ve které je nanášení pryskyřice i výztuže prováděno ručně na připravený povrch pozitivní nebo negativní formy. Forma se po naseparování obvykle nejprve opatří gelcoatem. Gelcoat je speciálně formulovaná povrchová vrstva, která zajišťuje jak estetickou stránku povrchu dílce, tak ochranu vůči okolnímu prostředí. Po částečném vytvrzení gelcoatu se postupně kladou do formy jednotlivé vrstvy výztuže a pomocí válečku se prosycují iniciovanou pryskyřicí. Kompozit se dále ponechá vytvrdit za pokojové teploty.



Obr. 18. Schéma ručního kladení [9]

Výhodami této technologie je jednoduchost provedení a nízké náklady na výrobu formy. Je vhodná pro velkorozměrové výrobky od jednoduchých až po značně složité dílce při nižší až střední sériovosti. Hlavními nevýhodami je kvalitní povrch pouze z jedné strany, nereprodukovatelnost odpadu, malá produktivita a fakt, že kvalita výrobku velmi závisí na zkušenostech a zručnosti pracovníka. [9]

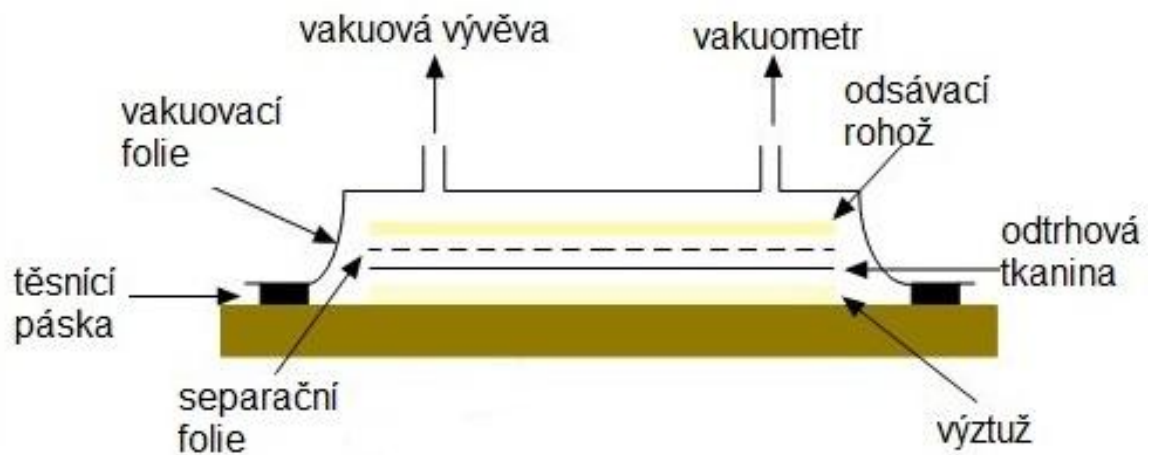
4.2 Lisování pomocí vakua

U této metody se prosycená výztuž aplikuje do formy jako při ručním kladení. Na poslední konstrukční vrstvy se pokládá tzv. odtrhová tkanina, kterou lze po vytvrzení lehce strhnout. Dále následuje separační folie a odsávací rohož, která vstřebává přebytečné pojivo a zároveň umožňuje odsátí vzduchových bublin vakuem. Poslední vrstvou je pružná vaku-

ovací folie, která se po obvodu utěsní oboustranně lepící páskou pro zajištění funkce vakuu. Přítlak se vyvozuje relativně malým podtlakem cca 0,3 - 0,9 bar. Formy jsou poměrně jednoduché a nákladově nenáročné stejně jako u technologie ručního kladení. Vytvrzování pak probíhá ve většině případů při normální teplotě.

Jako výztuže se využívá tkanin a pásků na bázi skleněných, uhlíkových nebo syntetických vláken všeho druhu, jejich kombinace nebo tzv. hybridní výztuže různé gramáže. Jako pojiva se používají polyesterové a epoxidové pryskyřice.

Vakuové lisování se používá pro malé až střední série, technologie nevyžaduje vysoké náklady krom investice do vakuové pumpy. Výrobky jsou oboustranně hladké a mají velmi dobré mechanické vlastnosti. [9]



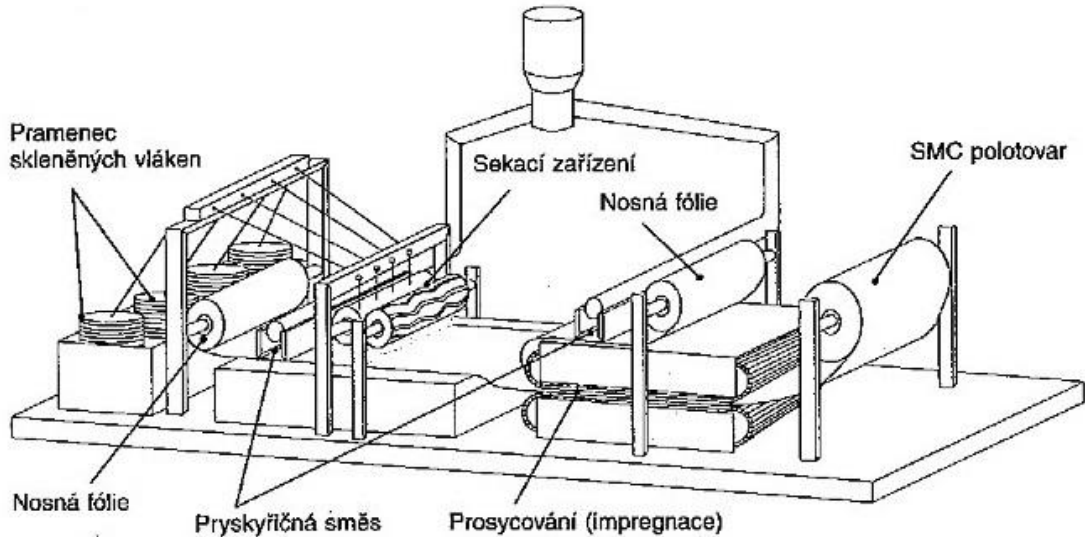
Obr. 19. Lisování pomocí vakua [9]

4.3 Plošné výlisky s polymerní maticí - SMC (Sheet molding compound)

Tato lisovací technologie se provádí za zvýšených teplot a tlaků ve dvou či vícedílných ocelových formách. Formy mají leštěný povrch dutin a vyhřívají se nejčastěji elektricky nebo pomocí topného média. Výchozím materiálem jsou prepregy SMC nebo lisovací směsi.

SMC prepregy - jsou to směsi sekaných vláken, pojiva na bázi polyesterových nebo vinylesterových pryskyřic převedené do částečně vytvrzeného stavu, plniv pigmentů

a dalších aditiv. Při zvýšené teplotě a tlaku jsou tyto prepregy schopny ve formě dalšího toku, tudíž materiál zaplní celou dutinu formy a dalším působením tepla dojde k vytvrzení. Jako výztuž se používají nejčastěji skleněná vlákna o délce 25 - 50 mm.



Obr. 20. Zařízení pro výrobu SMC polotovarů [5]

Lisování za tepla a tlaku je jednou z nejproduktivnějších technologií pro velkosériovou výrobu (2000 - 5000 kusů) malých až středně velkých dílů. Mezi výhody patří krátké výrobní cykly, vysoká reprodukovatelnost kvality a rozměrů a možnost celý proces automatizovat. Nevýhodou jsou velké pořizovací náklady forem a lisů. Výlisky z SMC prepregů se využívají např. pro panely karoserie automobilů, různé ochranné kryty apod. [5], [9], [14]



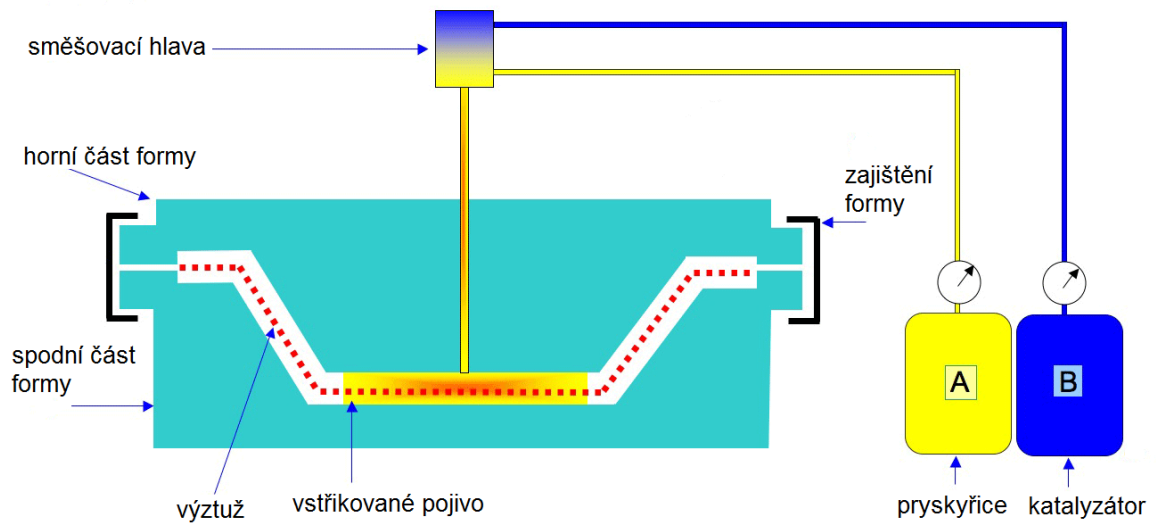
Obr. 21. Lis pro SMC materiály [11]

4.4 RTM (Resin Transfer Molding) - Lisování se vstříkem matrice

Do formy opatřené gelcoatem se vyskládá suchý vyztužující materiál na bázi skleněných či jiných vláken. Materiál musí mít strukturu umožňující snadný tok pryskyřičného systému, aby došlo k úplnému prosycení v krátkém čase. Forma se poté uzavře vrchním dílem a zajistí proti pootevření. Následuje vstříkování pojiva do doby, než je výztuž zcela prosycena v celém objemu dílce.

Formy mají robustní konstrukci, aby snesly vysoké tlaky. Jako pojivo se nejčastěji využívají polyesterové pryskyřice se zabudovaným urychlovačem

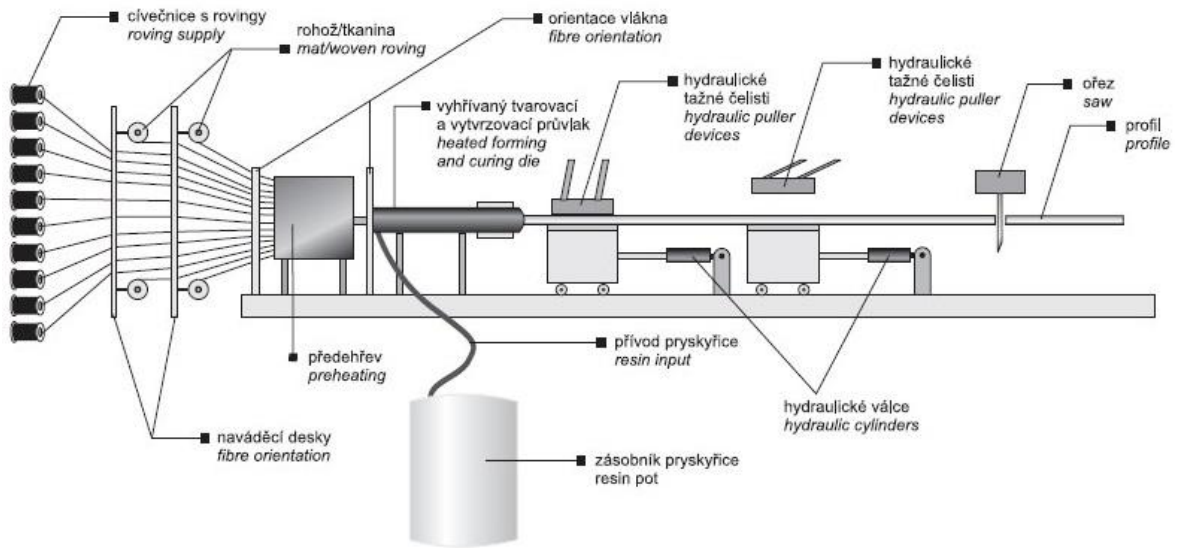
Technologie RTM je díky krátkým výrobním cyklům a reprodukovatelné kvalitě vhodná pro vyšší sériovou výrobu - stovky až tisíce kusů. Je třeba počítat s velkou investicí na vstříkovací zařízení vyššími náklady na výrobu forem. Uplatnění této technologie je především při výrobě nárazníků, podběhů a kapot nákladních automobilů, dále komponenty zemědělských a stavebních strojů a další. [9]



Obr. 22. Technologie RTM [9]

4.5 Tažení (pultruze)

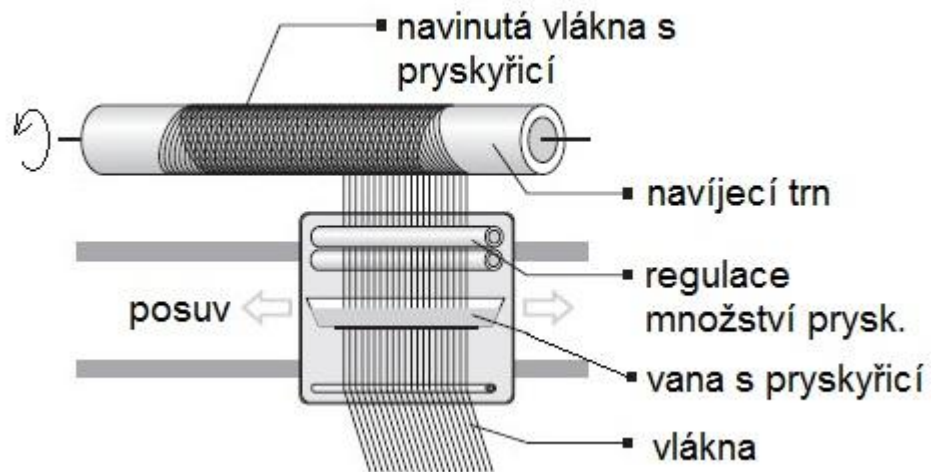
Pomocí této metody lze vyrábět kontinuálně různé duté, plné i tvarové profily a vysokým obsahem vyztužujícího vlákna (až 80 %). Jako výztuže se nejčastěji využívá skleněné, ale i uhlíkové vlákna, případně v kombinaci se stuhami z tkanin nebo rohoží pro získání příčného vyztužení. Vlákna prochází lázní s iniciovanou pryskyřicí a po prosycení a odstranění přebytečné pryskyřice jsou vtahována do tvarovacích a vytvrzovacích průvleků, jejichž dutina odpovídá tvaru požadovaného profilu. V průvleku dochází působením tepla k vytvrzení a kompozitní profil je dále odtahován hydraulickými čelistmi nebo pásovými elementy a nařezán na požadovanou délku. Matrice se používají nízkoviskozní polyesterové, vinylesterové nebo epoxidové pryskyřičné systémy. Technologie je vhodná pro kontinuální výrobu profilů od velmi tenkých a jednoduchých až po velmi složité a rozměrné. [9]



Obr. 23. Schéma pultruze [9]

4.6 Navíjení

U této technologie se výztuž impregnovaná pojivem navíjí na rotující trn ve tvaru výrobku. Vyrábějí se tak dutá kompozitní tělesa - trubky, nádrže, části letadel. Vhodné orientace vláken ve stěně nádoby je dosahováno vhodnou volbou rychlosti kladecího ústrojí při dané rychlosti otáčení jádra (trnu). Navíjet se mohou i prepregy, což zaručuje reprodukovatelné mechanické vlastnosti výrobků. Jako výztuž se zde používá skleněný roving, pro náročné aplikace uhlíkové nebo kevlarové pramence. Technologie navíjení je jednou z nejprogressivnějších metod pro výrobu dutých kompozitních výrobků. [9], [14]



Obr. 24. Schéma navíjení [9]

II. PRAKTICKÁ ČÁST

5 PŘÍPRAVA ZKUŠEBNÍCH TĚLES

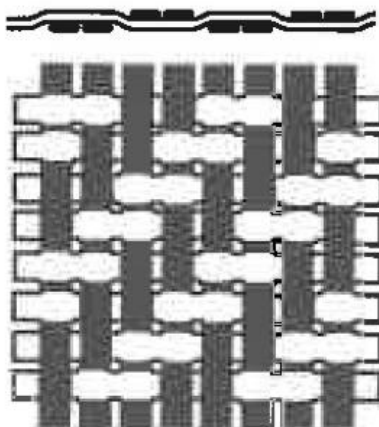
Pro testování únavového chování byla vyrobena zkušební tělesa ze dvou typů tkanin materiálu Kordcarbon metodou ručního laminování. Pro srovnání byla také testována tělesa ze skleněných vláken.

5.1 Použité Kordcarbon tkaniny pro zkušební tělesa

Jako vyztužující složka byla použita uhlíková tkanina od firmy Kordárna Plus a.s., která je přímým výrobcem těchto tkanin. Vlákná jsou dodávána od společnosti TORAY a nesou označení FT300B - 3000 - 40B. Toto vlákno dosahuje pevnosti v tahu 3805 MPa a modul pružnosti v tahu je 232 GPa.

5.1.1 Uhlíková tkanina A

Uhlíková tkanina použitá pro výrobu zkušebních těles má označení CC200 T - 100 KORDCARBON, gramáž 200g/m², vazba kepr, viz. technický list v příloze P I.



Obr. 25. Schéma vazby kepr [12]

5.1.2 Uhlíková tkanina B

Dalším typ uhlíkové tkaniny použitý pro výrobu zkušebních těles nese označení CC280 T4 - 100 KORDCARBON, gramáž 280g/m², vazba kepr, viz. technický list v příloze P II.

5.2 Výroba zkušebních těles z materiálu Kordcarbon

5.2.1 Příprava formy

Důkladná příprava formy je velmi důležitá pro výrobu dílce bez povrchových vad. Forma tvoří negativ budoucího výrobku, a proto se kvalita jejího povrchu odráží na kvalitě povrchu výrobku.

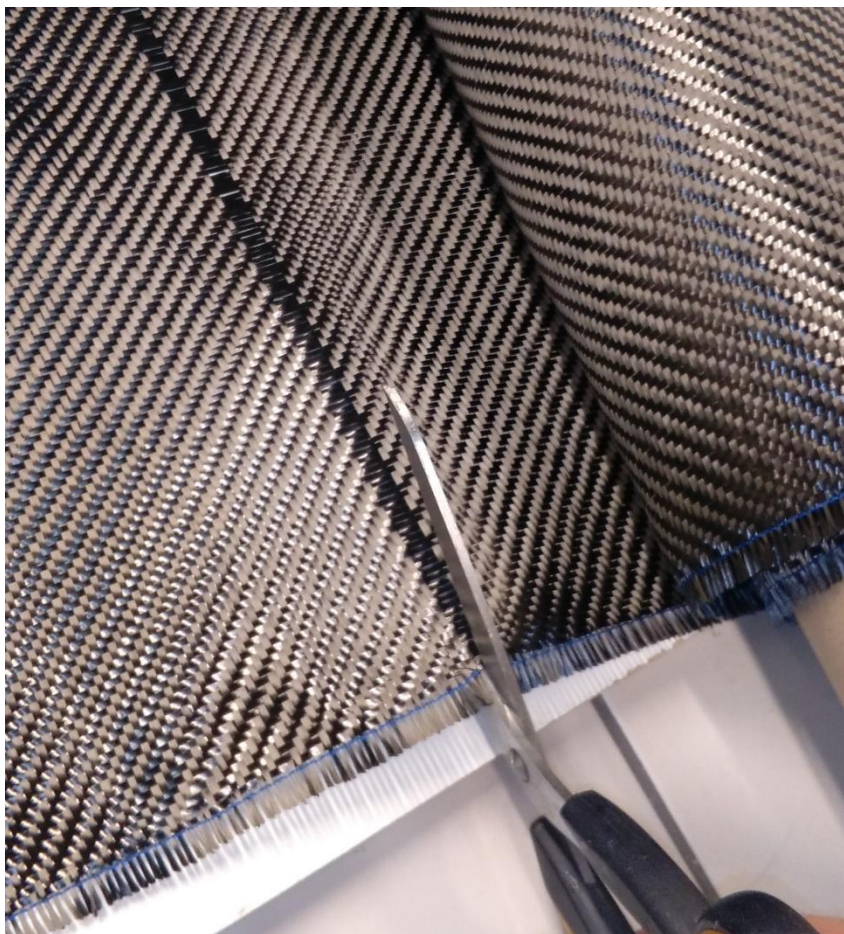
Jako forma pro výrobu zkušebních vzorků byla použita (plechová vana) s rovným povrchem. Povrch formy byl naseparován voskem TR INDUSTRIES - MOLD RELEASE a po zaschnutí byl vyleštěn. Tento proces se opakoval šestkrát.



Obr. 26. Separace povrchu formy

5.2.2 Příprava uhlíkové tkaniny

Nejprve bylo nutné určit rozměr zkušebních těles, který činil 100 mm x 15 mm. Celkový rozměr uhlíkové desky pak činil 320 mm x 500 mm s rezervou pro ořezání okrajů. Pro zajištění kolmosti při stříhání byl vysunut jeden roving z tkaniny, a tím bylo možné tkaninu rovně ustříhnout.



Obr. 27. Stříhání uhlíkové tkaniny

5.2.3 Příprava matrice

Jako matrice byla použita epoxidová pryskyřice HAVEL L285 spolu s tužidlem H285 v míchacím poměru 100:40. Tento nízkoviskózní epoxidový systém určený pro výrobu dílů s vysokým statickým a dynamickým zatížením. Je vhodný pro ruční laminaci v kombinaci se skleněnými, uhlíkovými nebo aramidovými vlákny.

Tabulka 2. Specifikace pryskyřice L285 a tužidla 285

Specifikace	Laminační pryskyřice L285	Tužidlo 285
Hustota g/cm ³ / 25°C	1,18 - 1,23	0,94 - 0,97
Viskozita mPas / 25°C	600 - 900	500 - 100

Pro zjištění množství potřebné epoxidové pryskyřice je nutné nejdříve zvážit tkaninu a tuto hmotnost vynásobit bezpečnostním koeficientem 1,5. Epoxidová pryskyřice a tužidlo byla namíchána v poměru 100:40 dle doporučení výrobce. Směs je potřeba dobře promíchat,

aby nedošlo k tomu že budou na výrobku nevytvrzená místa. Proces laminování je nezbytné stihnout dokončit do doby tzv. Gel-time - poté už je směs nezpracovatelná. V případě tužidla 285 je tato doba 2 - 3 hodiny při teplotě 20 - 25 °C.



Obr. 28. Míchání epoxidové pryskyřice a tužidla

5.2.4 Výroba desky, technologie ruční kladení

Na vyčištěnou a naseparovanou formu byla nanesena tenká vrstva epoxidové směsi a poté na ni byla uložena první vrstva tkaniny. Následně byla tkanina prosycena epoxidovou směsí pomocí štětce (Obr. 29). Pro vytlačení případných bublin byla použita plastová stěrka.

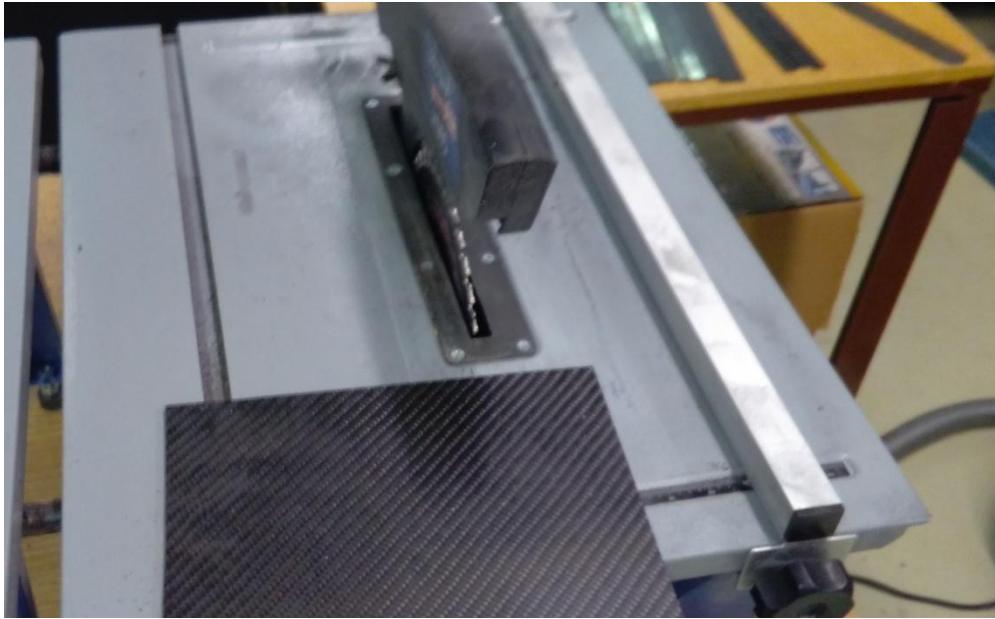


Obr. 29. Nanášení epoxidové směsi

Celý proces se opakuje až je nanesen potřebný počet vrstev tkaniny. V případě tkaniny kordcarbon A to bylo 12 vrstev což se rovná tloušťce zkušební tělesa $4 \text{ mm} \pm 0,1$. Kordcarbon tkaniny B bylo kladeno 5 vrstev a to se rovná tloušťce zkušební tělesa $2,6 \text{ mm} \pm 0,1$. Laminátová deska byla ponechána 24 hodin vytvrdit při pokojové teplotě, a poté mohla být odformována.

5.2.5 Dělení na zkušební tělesa

Pro nařezání uhlíkové desky na zkušební tělesa byla použita pila s diamantovým kotoučem. Nejprve byla deska zbavena nerovných okrajů a poté byla orýsována a nařezána na potřebnou velikost vzorků - $100 \text{ mm} \times 15 \text{ mm}$.



Obr. 30. Pila s diamantovým kotoučem

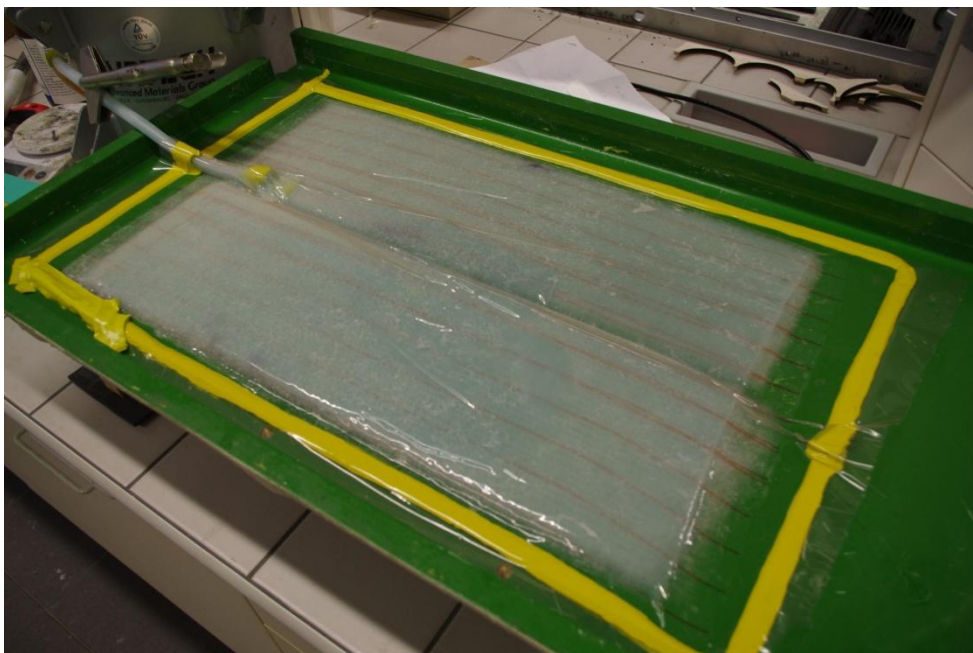


Obr. 31. Nařezaná zkušební tělesa

5.3 Zkušební tělesa ze skleněných vláken

5.3.1 4-axiální skelná tkanina

Pro výrobu těchto zkušebních těles byla použita 4-axiální skelná tkanina s označením Q-E-820 viz materiálový list v příloze P V. Vzorky se skládají z osmi vrstev. Jako matrice byla použita pryskyřice Biresin CR 82 s tužidlem CH 80-1 v poměru 100:27. Tyto vzorky byly vyrobeny pomocí ruční laminace stejně jako vzorky z materiálu kordcarbon, ale navíc zde bylo použito lisování pomocí vakua.



Obr. 32. Lisování pomocí vakua

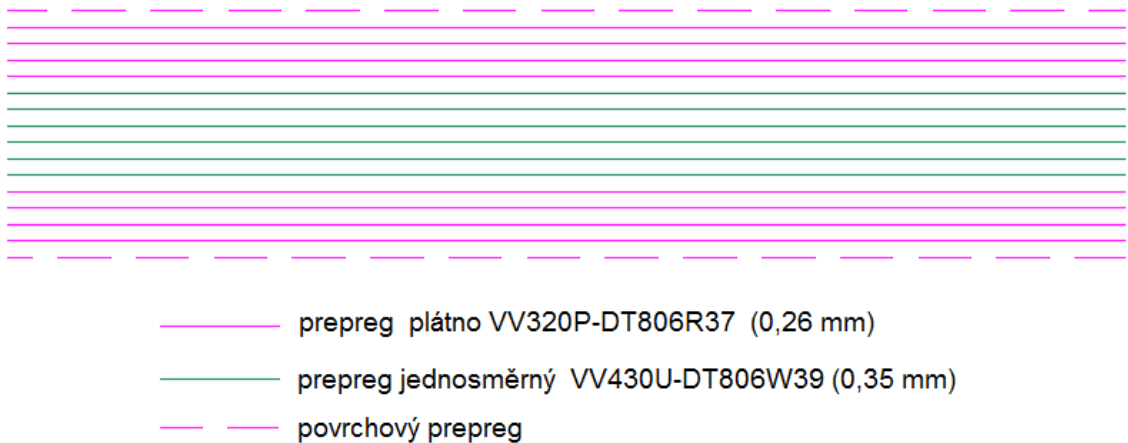
Tento materiál se používá pro výrobu pružiny pro skákací boty Poweriser (Obr. 31).



Obr. 33. Skákací boty Poweriser [10]

5.3.2 Skelný prepreg

Zkušební tělesa byly nařezány ze sklolaminátové listové pružiny. Tato pružina byla vyrobena ze skelného prepregu Deltapreg. Pružina se skládá ze dvou typů vyztužujících skelných prepregů - jednosměrný prepreg s hustotou 430g/m^2 a prepreg plátno s hustotou 320g/m^2 . Uspořádání jednotlivých vrstev je znázorněno na Obr. 34. Materiálové listy těchto prepregů jsou dostupné v příloze P III a P IV. Jako matrice prepregů byla použita epoxidová pryskyřice Deltatech DT806.



Obr. 34. Uspořádání jednotlivých vrstev sklolaminátové pružiny

6 MECHANICKÉ ZKOUŠKY TĚLES

6.1 Statická zkouška ohybem

Nejprve byla provedena statická zkouška jednoosým třibodovým ohybem, ze které byly zjištěny potřebné materiálové charakteristiky jako je modul pružnosti, mez pevnosti a maximální ohybová síla. Měření bylo provedeno v laboratoři Fakulty technologické na zkušebním stroji ZWICK 1456. Tento přístroj je určen pro statické i nízkocyklové dynamické zkoušky v tahu, tlaku, ohybu a smyku. Další možností je testování při snížené nebo zvýšené teplotě pomocí teplotní komory, která je součástí přístroje. Vyhodnocení výsledků probíhá na připojeném počítači pomocí softwaru TestXpert.

Tabulka 3. Parametry stroje ZWICK 1456

Maximální posuv příčnicku	800 [mm/min]
Snímače síly	2,5 kN a 20 kN
Teplotní komora	-80°C až +200°C



Obr. 35 Zkušební stroj ZWICK 1456

Vzdálenost mezi podpěrami byla nastavena na 80 mm a zaoblení podpěr i zatěžovacího trnu bylo 5 mm.



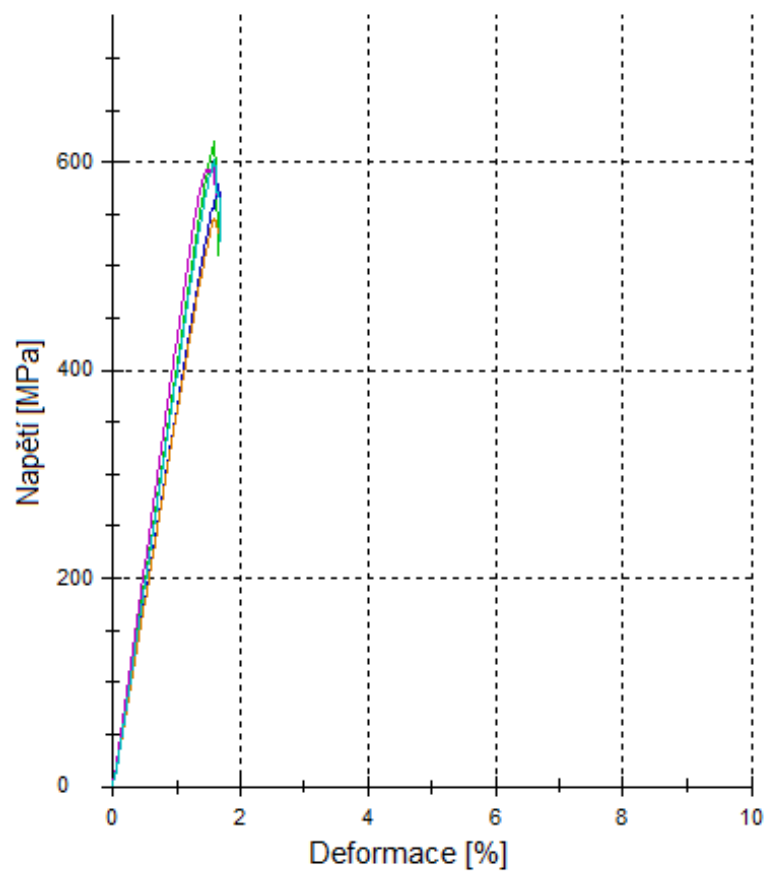
Obr. 36. Průběh statické zkoušky v ohybu na stroji ZWICK 1456

6.1.1 Naměřená data jednotlivých vzorků při statické zkoušce

V tabulce 4 - 7. je vyhodnocen modul pružnosti v ohybu E , mez pevnosti v ohybu σ_{fM} a maximální ohybová síla potřebná pro zlomení zkušebního tělesa. Z této maximální síly bylo posléze určeno zatížení pro cyklické zkoušky.

Tabulka 4. Základní materiálové charakteristiky zk. těles z Kordkarbon tkaniny A

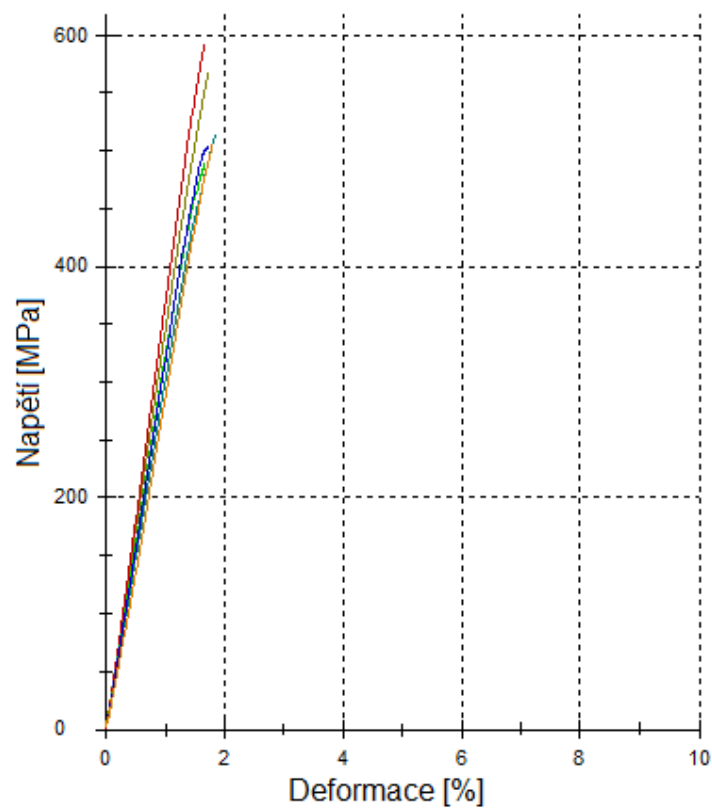
Kordcarbon A	E [MPa]	σ_{fM} [MPa]	$F_{O_{max}}$ [N]
$n = 6$			
1.1	42800	631	1120
1.2	39300	622	1240
1.3	34900	578	1160
1.4	34500	547	1090
1.5	41900	599	1200
1.6	38200	604	1210
Průměrná hodnota	38600	597	1170
Směrodatná odchylka	3154	28	52
Variační koeficient [%]	8,2	4,7	4,5



Obr. 37. Závislost napětí na poměrné deformaci
pro zk. tělesa z Kordkarbon tkaniny A

Tabulka 5. Základní materiálové charakteristiky zk. těles z Kordkarbon tkaniny B

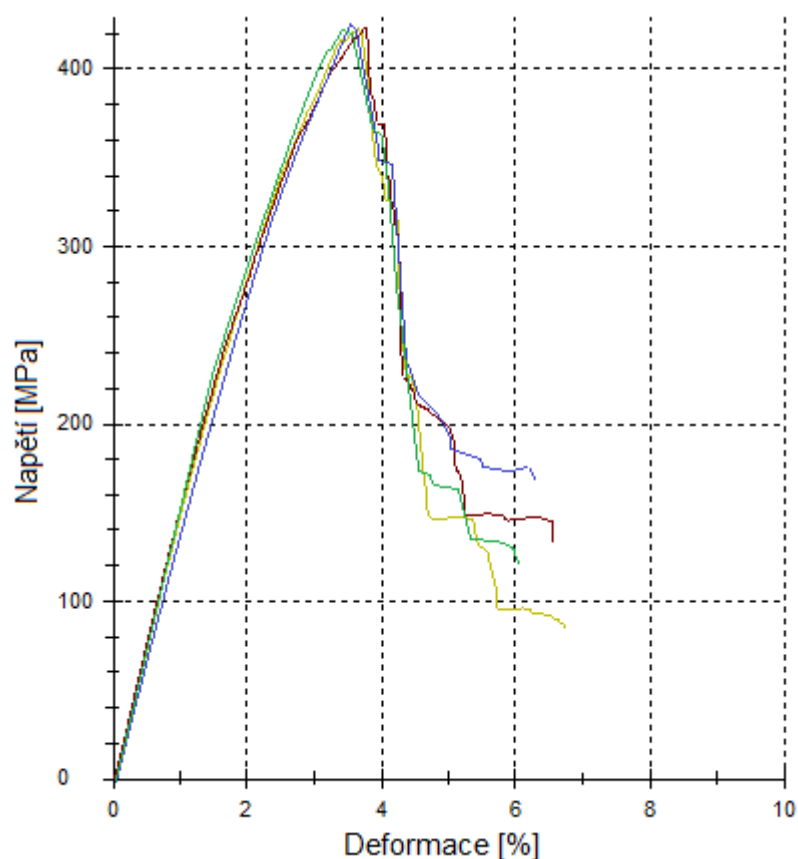
Kordcarbon B	E [MPa]	σ_{fM} [MPa]	Fo _{max} [N]
n = 6			
1.1	28900	515	671
1.2	33300	569	755
1.3	35300	593	788
1.4	30900	490	637
1.5	30500	504	686
1.6	26500	508	661
Průměrná hodnota	30900	530	700
Směrodatná odchylka	2847	38	54
Variační koeficient [%]	9,2	7,1	7,7



Obr. 38. Závislost napětí na poměrné deformaci
pro zk. tělesa z Kordkarbon tkaniny B

Tabulka 6. Základní materiálové charakteristiky zk. těles ze 4-axiální skelné tkaniny

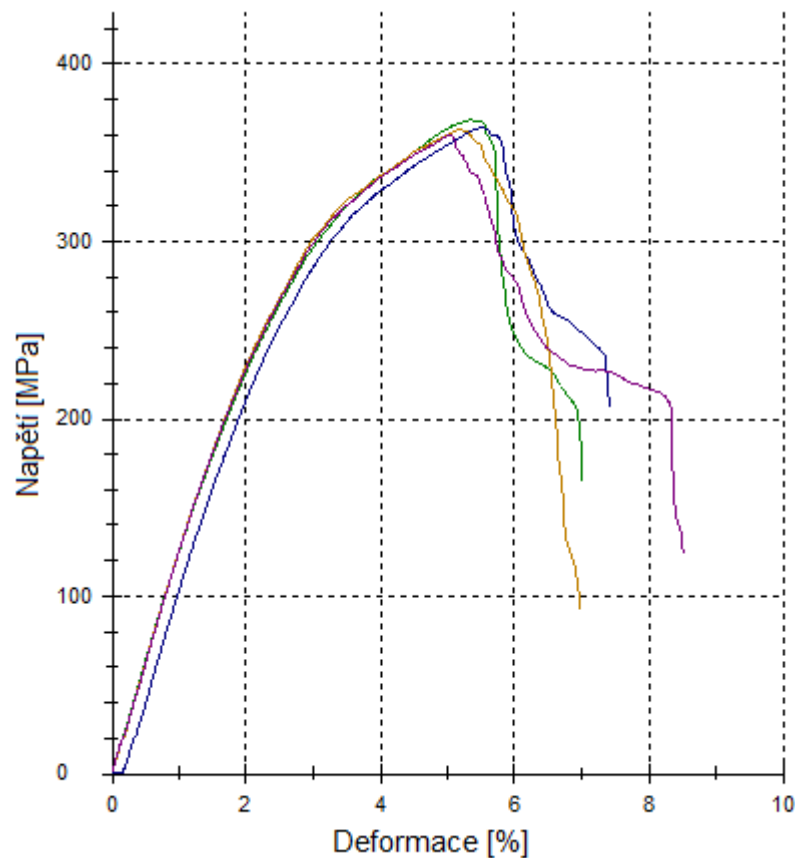
4-axiální skelná tkanina	E [MPa]	σ_{fM} [MPa]	Fo _{max} [N]
n = 4			
1.1	14400	423	3050
1.2	15000	424	2840
1.3	14900	423	2955
1.4	15010	428	2935
Průměrná hodnota	14828	425	2945
Směrodatná odchylka	251	2	75
Variační koeficient [%]	1,7	0,5	2,5



Obr. 39. Závislost napětí na poměrné deformaci
pro zk. tělesa ze 4-axiální skelné tkaniny

Tabulka 7. Základní materiálové charakteristiky zk. těles z prepreg sklolaminátu

skelný prepreg	E [MPa]	σ_{FM} [MPa]	Fo _{max} [N]
n = 4			
1.1	11400	368	966
1.2	11250	365	923
1.3	10700	363	901
1.4	10400	360	914
Průměrná hodnota	10938	364	926
Směrodatná odchylka	405	3	24
Variační koeficient [%]	3,7	0,8	2,6



*Obr. 40. Závislost napětí na poměrné deformaci
pro zk. tělesa z prepreg sklolaminátu*

6.2 Cyklické únavové zkoušky

Cyklické zkoušky únavy materiálu byly prováděny v laboratoři Centra polymerních systémů Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně. Pro tyto zkoušky byl použit servohydraulický univerzální zkušební stroj INSTRON 8871. Tento stroj je určený především pro cyklické zkoušky únavového namáhání, ale je možno jej také využít pro zkoušky statické. Základna stroje je opatřena T-drážkou, kde je možné upnout celou škálu zkušebních komponentů pro různé typy zkoušek. Únavové zkoušky byly prováděny cyklickým ohybovým zatížením při třibodovém uspořádání. Vzdálenost mezi podpěrami byla nastavena shodná jako u statické zkoušky.



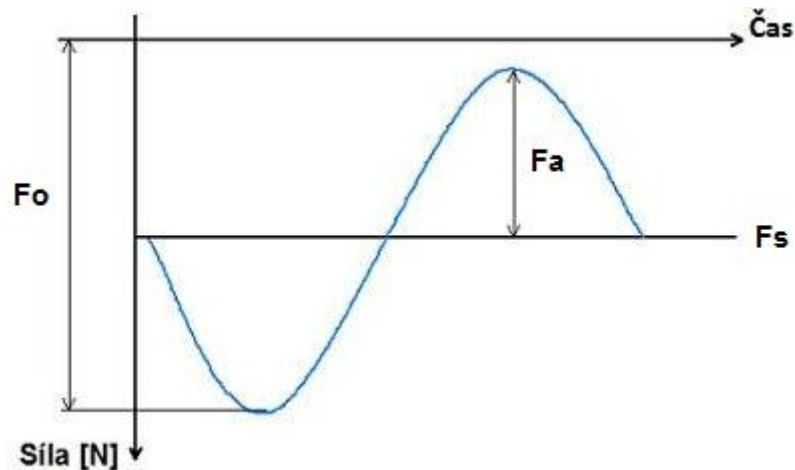
Obr. 41. Zkušební stroj INSTRON 8871



Obr. 42. Uspořádání cyklické ohybové zkoušky

6.2.1 Nastavující parametry cyklické zkoušky

Před provedením samotné zkoušky bylo provedeno několik zkušebních měření. Následně byla zvolena frekvence zatěžování 6 Hz a dvě velikosti zatížení - 80% a 90% z maximální ohybové síly, která byla zjištěna při statické zkoušce. Dále byla zvolena střední síla kmitu F_s a amplituda zatěžování F_a . Průběh zatěžovací křivky byl zvolen sinusový. Přehled jednotlivých zatížení je znázorněn v následujících tabulkách č. 8 - 11.



Obr. 43. Sinusový průběh zatížení

Tabulka 8. Parametry zatížení cyklické zkoušky zk. těles z Kodkarbon tkaniny A

	Velikost zatížení	
	80% $F_{o_{max}}$	90% $F_{o_{max}}$
frekvence [Hz]	6	6
F_s [N]	730	850
F_a [N]	200	200
F_o [N]	930	1050

Tabulka 9. Parametry zatížení cyklické zkoušky zk. těles z Kodkarbon tkaniny B

	Velikost zatížení	
	80% $F_{o_{max}}$	90% $F_{o_{max}}$
frekvence [Hz]	6	6
F_s [N]	360	430
F_a [N]	200	200
F_o [N]	700	630

Tabulka 10. Parametry zatížení cyklické zkoušky zk. těles ze 4-axiální skelné tkaniny

	Velikost zatížení	
	80% $F_{o_{max}}$	90% $F_{o_{max}}$
frekvence [Hz]	6	6
F_s [N]	2056	2351
F_a [N]	300	300
F_o [N]	2356	2651

Tabulka 11. Parametry zatížení cyklické zkoušky zk. těles z deltapreg sklolaminátu

	Velikost zatížení	
	80% $F_{o_{max}}$	90% $F_{o_{max}}$
frekvence [Hz]	6	6
F_s [N]	541	634
F_a [N]	200	200
F_o [N]	741	834

7 VÝSLEDKY JEDNOTLIVÝCH ZKOUŠEK

Pro studium únavového chování byly porovnány výsledky statické zkoušky tříbodovým ohybem provedené před a po cyklické únavové zkoušce, popřípadě byl stanoven počet cyklů, při kterém došlo k porušení zkušebního tělesa v průběhu cyklické zkoušky.

7.1 Zkušební tělesa z uhlíkové tkaniny A

7.1.1 Výsledky statické zkoušky cyklicky zatížených těles - nízké počty cyklů

Nejprve bylo provedeno cyklování při zatížení 80% z maximální síly $F_{0\max}$ pro 1000, 5000 a 10 000 cyklů. Následně byla provedena opět statická zkouška v tříbodovém ohybu a získané hodnoty byly porovnány s výsledky statické zkoušky cyklicky nezatížených zkušebních těles, pro zjištění zda došlo k nějakým změnám pro toto nízkocyklové namáhání. V tabulce 12. jsou shrnuta data získaná statickou zkouškou zkušebních těles, která byla cyklicky zatížena 80% maximální ohybové síly pro určité počty cyklů.

Tabulka 12. Výsledky statické zkoušky cyklicky zatížených těles

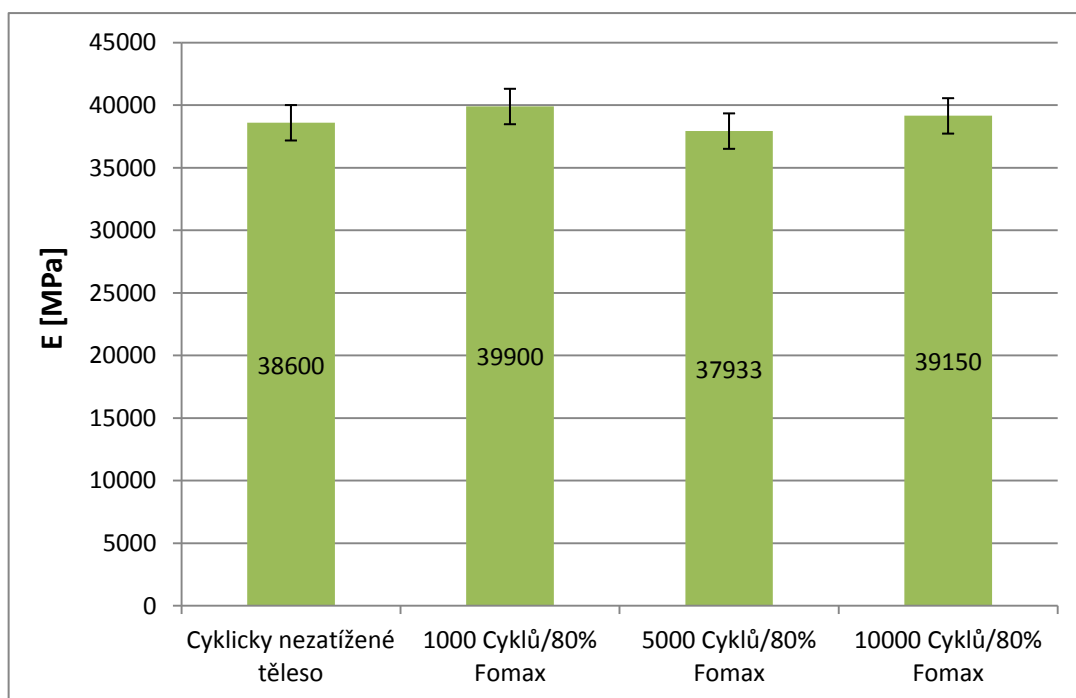
Kordcarbon A zk. těleso č.	1000 cyklů		5000 cyklů		10000 cyklů	
	E [MPa]	σ_{fM} [MPa]	E [MPa]	σ_{fM} [MPa]	E [MPa]	σ_{fM} [MPa]
1.1	38900	579	38600	568	40800	603
1.2	41500	634	36300	583	37500	578
1.3	38100	574	38900	594	-	-
1.4	41100	630	-	-	-	-
Průměrná hodnota	39900	604	37933	582	39150	591
Směrodatná odchylka	1435	28	1161	11	1650	13
Variační koeficient [%]	3,6	4,6	3,1	1,8	4,2	2,1

V tabulce 13. jsou srovnány průměrné hodnoty modulu pružnosti a meze pevnosti v ohybu pro cyklicky nezatížená tělesa a pro tělesa která byla cyklicky zatížena určitým počtem cyklů.

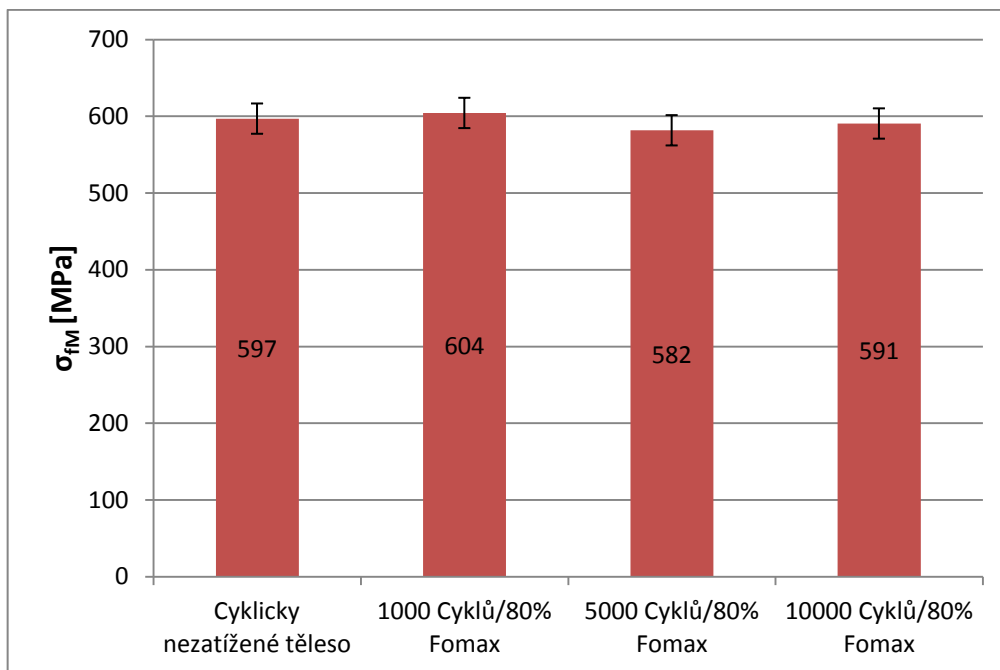
Tabulka 13. Srovnání průměrných hodnot pro cyklicky nezatížená a zatížená tělesa

Kordcarbon A	E [MPa]	σ_{fM} [MPa]
Cyklicky nezatížená zk. tělesa	38600	597
1000 Cyklů/80% Fomax	39900	604
5000 Cyklů/80% Fomax	37933	582
10000 Cyklů/80% Fomax	39150	591

Vzorky z 12 vrstev uhlíkové tkaniny A nevykazovaly téměř žádné změny hodnot modulu pružnosti ve srovnání s výsledky statické zkoušky dynamicky nezatížených těles. Obdobné výsledky platí pro mez pevnosti v ohybu, jenž zůstala po těchto počtech cyklů při zatížení 80 % $F_{o_{max}}$ taktéž prakticky nezměněna. Ke změnám hodnot docházelo pouze v rámci chyby měření. Srovnání modulu pružnosti a meze pevnosti v ohybu cyklicky zatížených a nezatížených těles je znázorněno na obrázku 44. a 45.



Obr. 44. Srovnání modulu pružnosti před a po cyklování pro zk. tělesa z kordcarbon tkaniny A



Obr. 45. Srovnání meze pevnosti před a po cyklování pro zk. tělesa z kordcarbon tkaniny A

7.1.2 Výsledky statické zkoušky cyklicky zatížených těles - vysoké počty cyklů

Další zkoušky byly provedeny při zatížení 80 % a 90 % z maximální ohybové síly. Při zatížení 80 % Fomax byly vzorky cyklovány až na 150 000 cyklů, přičemž nedošlo k žádnému viditelnému poškození ani prasknutí těchto zkušebních těles. Byla tedy poté opět provedena statická zkoušky v ohybu. V tabulce 14. jsou znázorněny výsledky statické zkoušky po 150 000 cyklech při zatížení 80 % Fo_{max}.

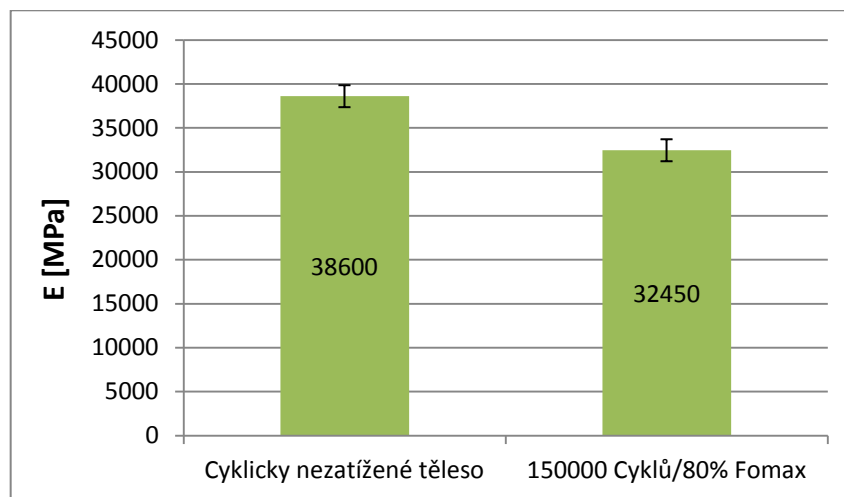
Tabulka 14. Výsledky statické zkoušky zk. těles po 150 000 cyklech

Kordcarbon A	150 000 cyklů / 80 % Fo _{max}	
	E [MPa]	σ _{fm} [MPa]
zk. těleso č.		
1.1	31200	586
1.2	33700	557
Průměrná hodnota	32450	572
Směrodatná odchylka	1250	15
Variační koeficient [%]	3,9	2,5

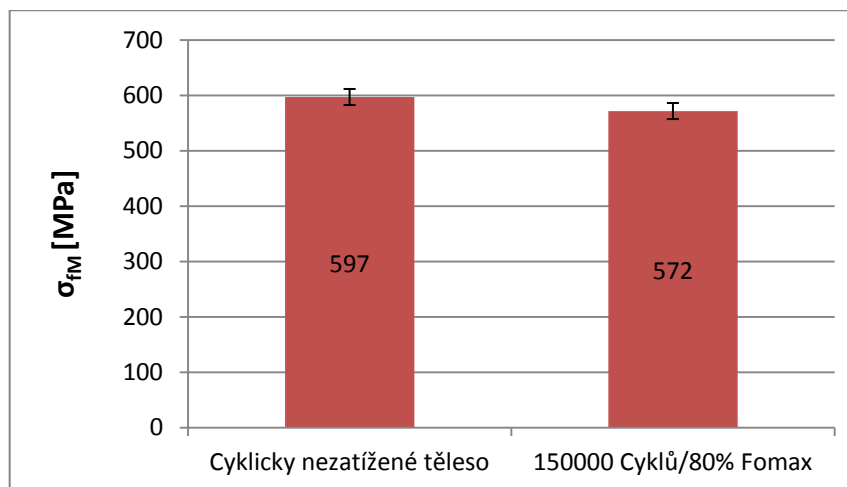
Tabulka 15. Srovnání průměrných hodnot cyklicky nezatížených těles a těles po 150 000 cyklech

Kordcarbon A	E [MPa]	σ_{fM} [MPa]
Cyklicky nezatížené zk. těleso	38600	597
150000 Cyklů/80% Fomax	32450	572

Pro 150 000 cyklech při zatížení 80% maximální síly vykazovaly zkušební tělesa mírný pokles modulu pružnosti, přesněji tedy o 15%. U meze pevnosti došlo taktéž k mírnému poklesu, tento pokles je však na hranici chyby měření. Srovnání je znázorněno na obrázku 46. a 47.



Obr. 46. Srovnání modulu pružnosti před a po 150 000 cyklech pro zk. tělesa z kordcarbon tkaniny A



Obr. 47. Srovnání meze pevnosti před a po 150 000 cyklech pro zk. tělesa z kordcarbon tkaniny A

U další cyklické zkoušky bylo nastaveno zatížení na 90 % maximální ohybové síly, aby bylo zjištěno kolik cyklů vydrží tyto vzorky při takto vysokém zatížení. Výsledné počty cyklů jsou zobrazeny v tabulce 16.

Tabulka 16. Výsledné počty cyklů při 90 % zatížení materiálu kordcarbon A

Zk. těleso č.	Počet cyklů při zatížení 90% $F_{o_{max}}$
1.1	46 250
1.2	78 541
1.3	23 122

V tabulce 16. lze pozorovat značné rozdíly v počtech cyklů, které zkušební tělesa vydržela při zatížení 90 % $F_{o_{max}}$. Tyto rozdíly mohou být způsobeny vadami ve struktuře materiálu, jako jsou například bubliny nebo nedostatečné prosycení pryskyřicí v některých místech vzorku. Kvalita nejen uhlíkových, ale i jiných kompozitů, je tedy velmi závislá na pečlivosti výroby.

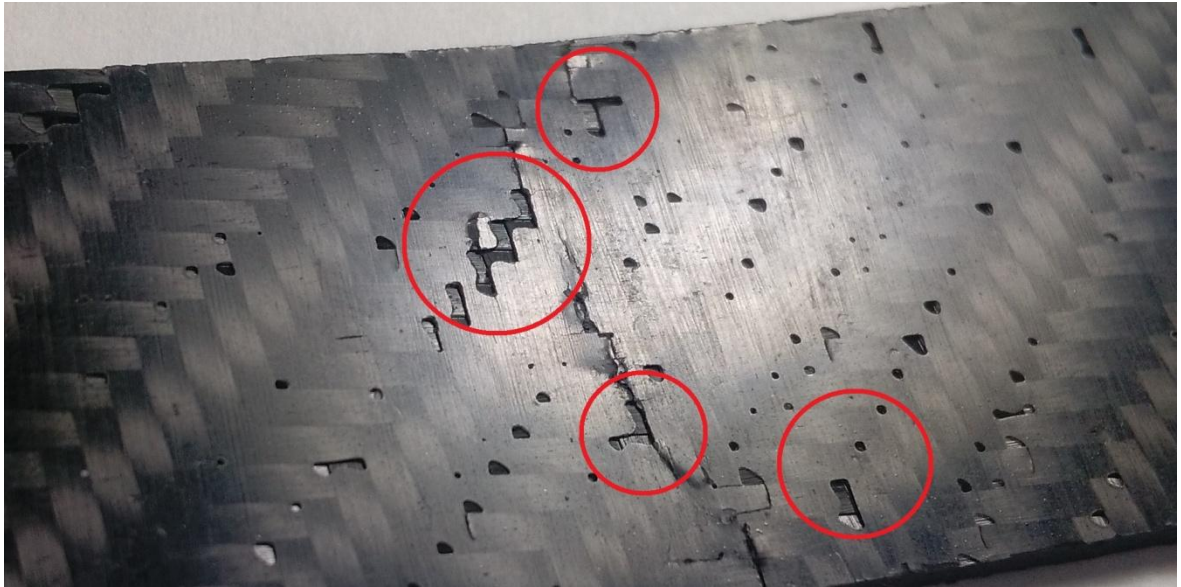
7.2 Zkušební tělesa z uhlíkové tkaniny B

Zkušební tělesa z uhlíkové tkaniny B se skládají z 5 vrstev. Cyklické zkoušky byly opět provedeny při zatížení 80 % a 90 % maximální ohybové síly. Počty cyklů, které vzorky vydržely při zatížení 90 % $F_{o_{max}}$ jsou zobrazeny v tabulce 17.

Tabulka 17. Výsledné počty cyklů při 90 % zatížení zk. těles z tkaniny kordcarbon B

Zk. těleso č.	Počet cyklů při zatížení 90% $F_{o_{max}}$
1.1	7 752
1.2	8 108
1.3	4 276

Jak je vidět v tabulce 17. zkušební tělesa z uhlíkové tkaniny B nevydržely při 90 % zatížení ani zdaleka takové počty cyklů jako vzorky z uhlíkové tkaniny A. To však může být způsobeno do značné míry tím, že na tělesech z uhlíkové tkaniny B jsou viditelné vady v podobě nedostatečného prosycení pryskyřicí viz. Obr. 48.

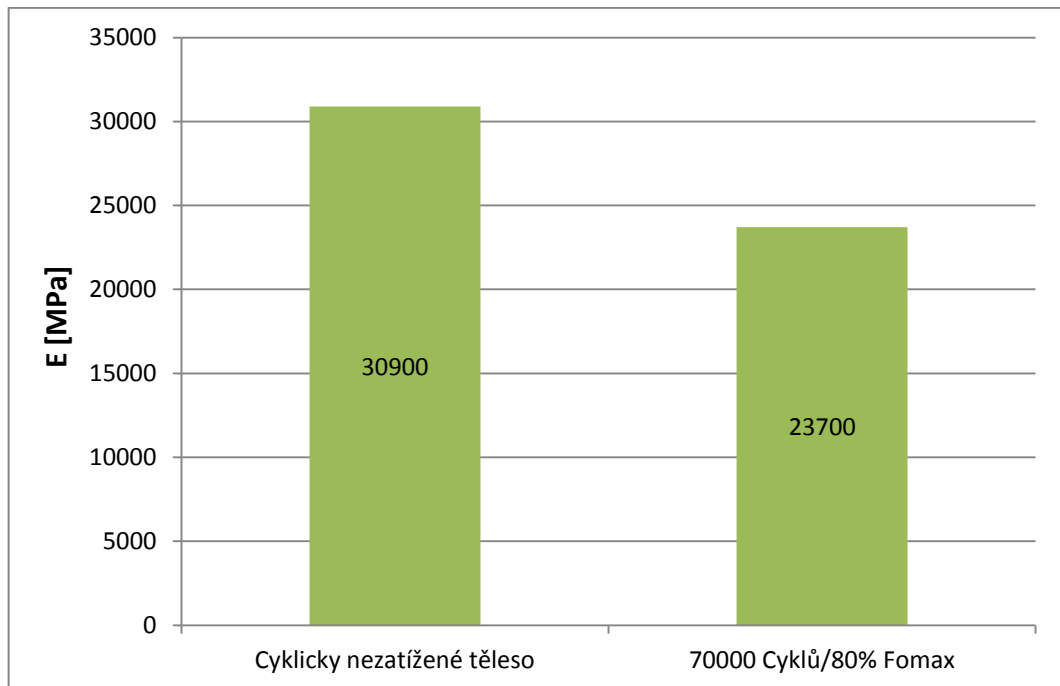


Obr. 48. Vady vzorku - nedostatečné prosycení pryskyřicí

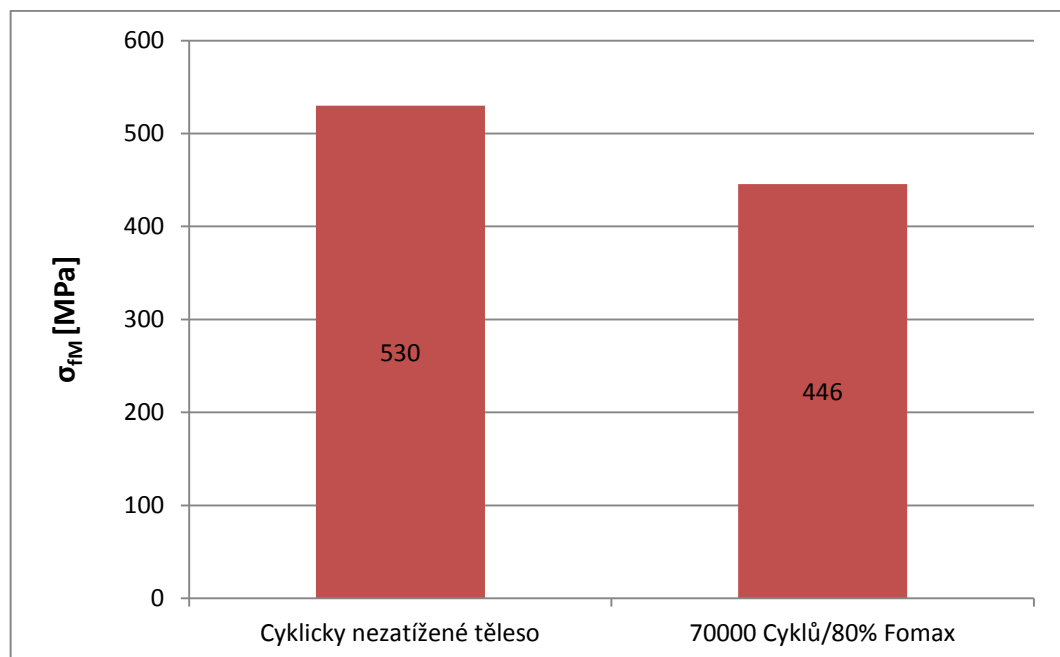
Pro zatížení 80% $F_{o_{max}}$ byly zkušební tělesa cyklovány na 70 000 cyklů a poté byly provedeny opět statické zkoušky v ohybu. Jak je vidět na Obr. 49. a 50. po 70 000 cyklech došlo ke snížení modulu pružnosti o 23 %. Zkušební tělesa taktéž vykazovaly snížení meze pevnosti v ohybu v průměru o 15 % ve srovnání s dynamicky nezatíženými tělesy.

Tabulka 18. Srovnání průměrných hodnot cyklicky nezatížených těles a těles po 70 000 cyklech

Kordcarbon B	E [MPa]	σ_{fM} [MPa]
Cyklicky nezatížené zk. tělesa	30900	530
70000 Cyklů/80% $F_{o_{max}}$	23700	446



*Obr. 49. Srovnání modulu pružnosti před a po 70000 cyklech
pro zk. tělesa z kordcarbon tkaniny B*



*Obr. 50. Srovnání meze pevnosti v ohybu před a po 70000 cyklech
pro zk. tělesa z kordcarbon tkaniny B*

7.3 Sklolaminátová zkušební tělesa

Cyklické zkoušky únavy byly provedeny také pro dva druhy sklolaminátových zkušebních těles. Velikost zatížení byla opět nastavena na 80 % a 90 % z maximální ohybové síly, která byla naměřena při statické zkoušce ohybem. Následně pak bylo možné porovnat počty cyklů, které vydržely sklolaminátové zkušební tělesa, s počty cyklů, jenž byly naměřeny u laminátů z uhlíkové tkaniny.

7.3.1 Zkušební tělesa ze 4-axiální skelné tkaniny

Naměřené počty cyklů, při kterých došlo k porušení zkušebních těles jsou znázorněny v tabulce 19.

Tabulka 19. Počty cyklů pro zk. tělesa ze 4-axiální skelné tkaniny

Zk. těleso č.	Počet cyklů	
	zatížení 80% F _{o max}	zatížení 90% F _{o max}
1.1	12 326	3 749
1.2	11 343	2 534
1.3	15 032	-

Jak je patrné z tabulky 19., zkušební tělesa ze 4-axiální skelné tkaniny nevydržely mnoho cyklů pro takto vysoké úrovně zatížení.

7.3.2 Zkušební tělesa ze skelného prepregu

Naměřené počty cyklů, při kterých došlo k porušení zkušebních těles jsou znázorněny v tabulce 20.

Tabulka 20. Počty cyklů pro zk. tělesa ze skelného prepregu

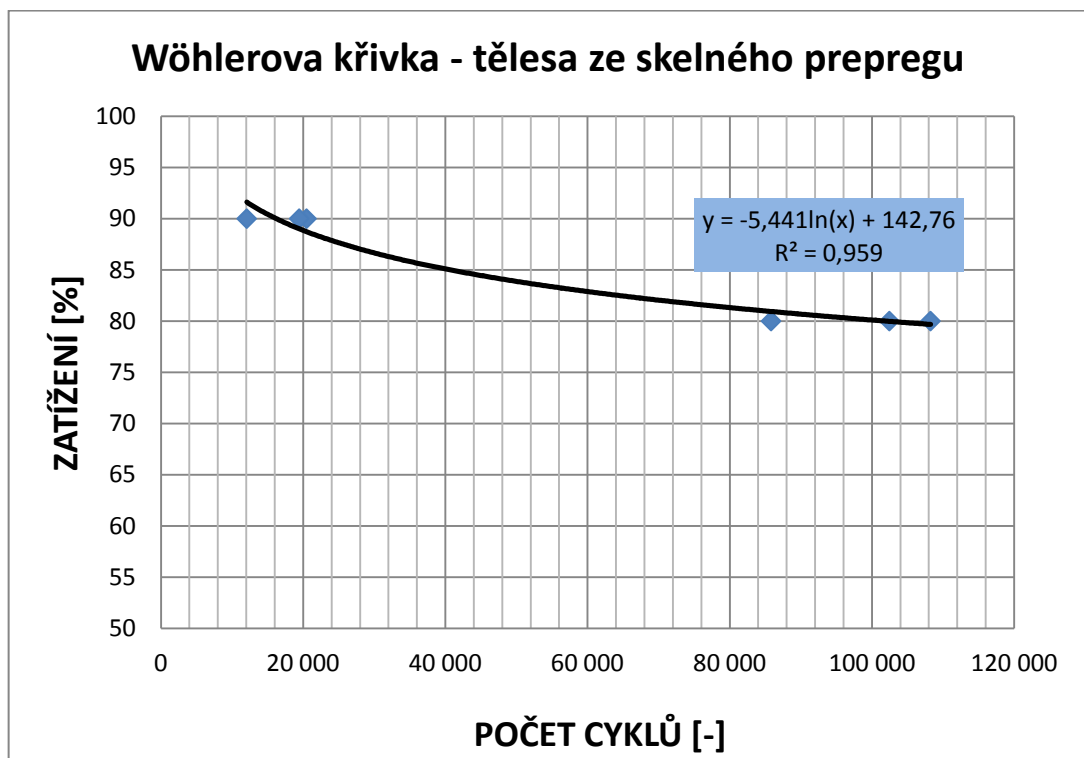
Zk. těleso č.	Počet cyklů	
	zatížení 80% F _{o max}	zatížení 90% F _{o max}
1.1	85 821	12 073
1.2	108 249	20 487
1.3	102 460	19 452

Zkušební tělesa ze skelného prepregu, vydržely poměrně vysoké počty cyklů ve srovnání se zkušebními tělesy ze 4-axiální skelné tkaniny. Výrobky z prepregů mají vysoký podíl vláknové výztuže, čímž dosahují výborných mechanických vlastností. Oproti technologii

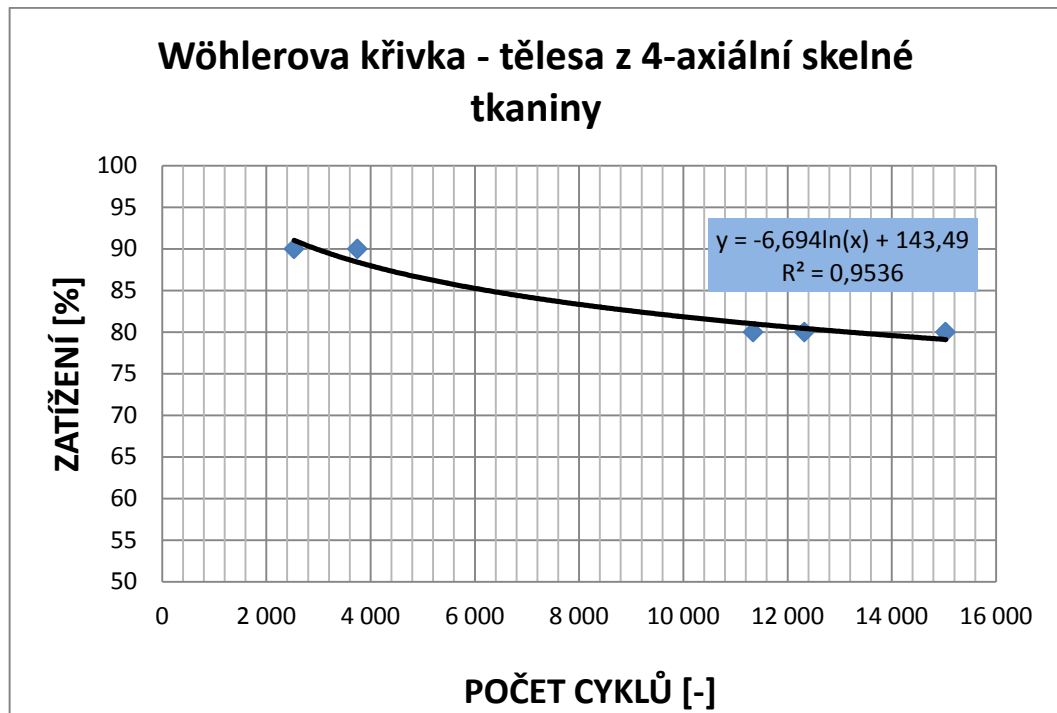
ruční laminace je zde vláknová výztuž rovnoměrně prosycena, což mnohonásobně zlepšuje odolnost proti únavě.

7.3.3 Wöhlerovy křivky

Z naměřených hodnot byly vytvořeny křivky životnosti pro zkušební tělesa ze skelného prepregu a 4-axiální skelné tkaniny (Obr. 51 a 52). Pro přesnější sestavení těchto křivek by bylo nutné provést více zkoušek i pro nižší úrovně zatížení. To by však vyžadovalo vysoké počty cyklů a velkou časovou náročnost, z těchto důvodů nebyla možnost tyto zkoušky provést.



Obr. 51. Wöhlerova křivka - tělesa ze skelného prepregu

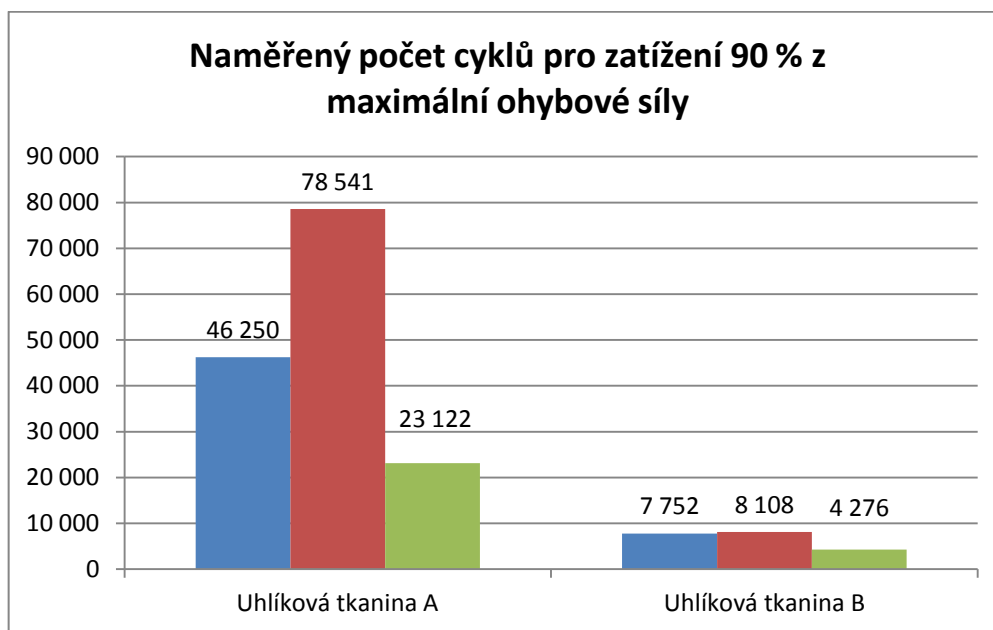


Obr. 52. Wöhlerova křivka - tělesa z 4-axiální skelné tkaniny

8 VYHODNOCENÍ NAMĚŘENÝCH HODNOT

8.1 Materiál Kordcarbon

Mezi zkušebními tělesy z uhlíkové tkaniny A a B byly značné rozdíly v počtech cyklů, které tyto tělesa vydržely. Zkušební tělesa z uhlíkové tkaniny B vydržely při 90% zatížení o desítky tisíc cyklů méně než zkušební tělesa z uhlíkové tkaniny A (Obr. 53). Tento rozdíl může být způsoben horší kvalitou vzorků, způsobenou nedostatečným prosycením pryskyřice při výrobě.



Obr. 53. Srovnání počtu cyklů pro zkušební tělesa z uhlíkové tkaniny A a B

Zkušební tělesa z uhlíkové tkaniny A byly cyklovány až na 150 000 cyklů při 80% zatížení, přičemž ani po tomto počtu cyklů nedošlo ke zlomení zkušebních těles. Po následném provedení statické zkoušky v ohybu, byl zjištěn jen mírný pokles modulu pružnosti a meze pevnosti v ohybu. Při stejném zatížení (80 %) a počtu cyklů 70 000 byly testovány i vzorky z uhlíkové tkaniny B, kde byl po statické zkoušce naměřen pokles modulu pružnosti o 23 % a meze pevnosti o 15 %.

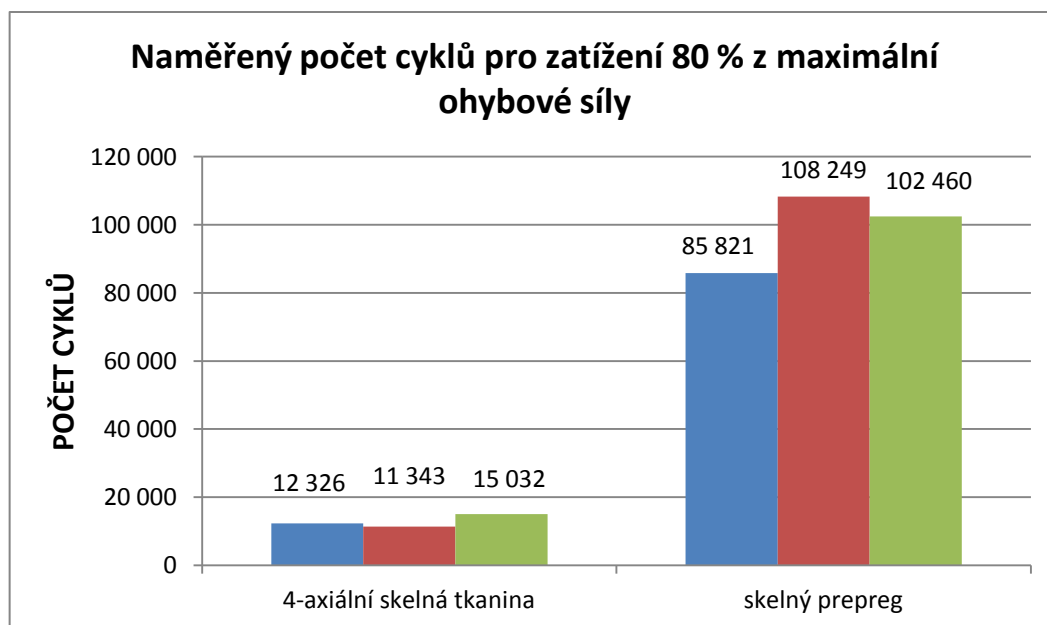
Vzorky z uhlíkové tkaniny B byly také testovány při zatížení 80 % pro nízké počty cyklů - 1000, 5000 a 10 000. Pro tyto počty cyklů nebyly zaznamenány žádné změny mechanických vlastností materiálu.

Zkušební tělesa z uhlíkové tkaniny byly vyráběny metodou ruční laminace. U této metody je nutné zamezit vzniku vzduchových mezer, což není nikdy stoprocentně možné. Od kvality výroby se pak také odvíjí životnost daného kompozitu. To lze pozorovat i při srovnání zkušebních těles z uhlíkové tkaniny A a B, přičemž tělesa z tkaniny B s větší gramáží nedosahovaly takové únavové životnosti jako tělesa z tkaniny A s menší gramáží.

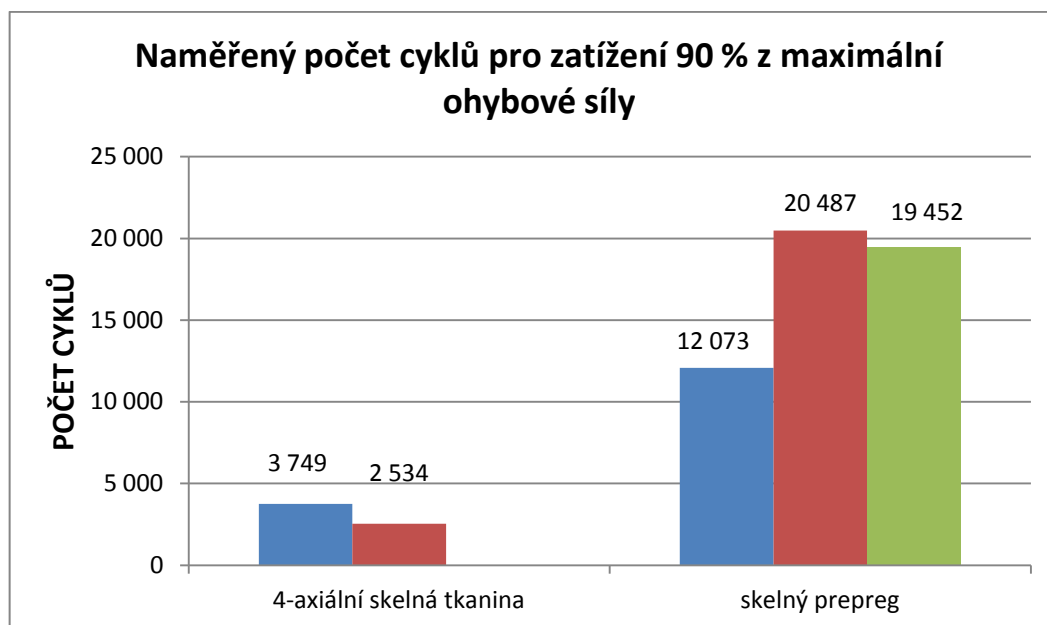
Je zde předpoklad, že při použití například autoklávové technologie a uhlíkových prepregů, bude únavová životnost ještě mnohem vyšší, než u metody ruční laminace. Hlavní výhodou prepregů je vysoký podíl vláknové výztuže, stejnoměrnost a hladkost hotových dílů, které souvisí s předem definovatelným a přesným uložením výztuže. Výsledný kompozitní výrobek má pak výborné mechanické vlastnosti.

8.2 Skelné lamináty

Zkušební tělesa ze skelného prepregu vydržely mnohem větší počty cyklů, oproti zkušebním tělesům z 4-axiální skelné tkaniny. Srovnání počtu cyklů je znázorněno na Obr. 54. a 55.



Obr. 54. Srovnání počtu cyklů skelných laminátů při zatížení 80 %

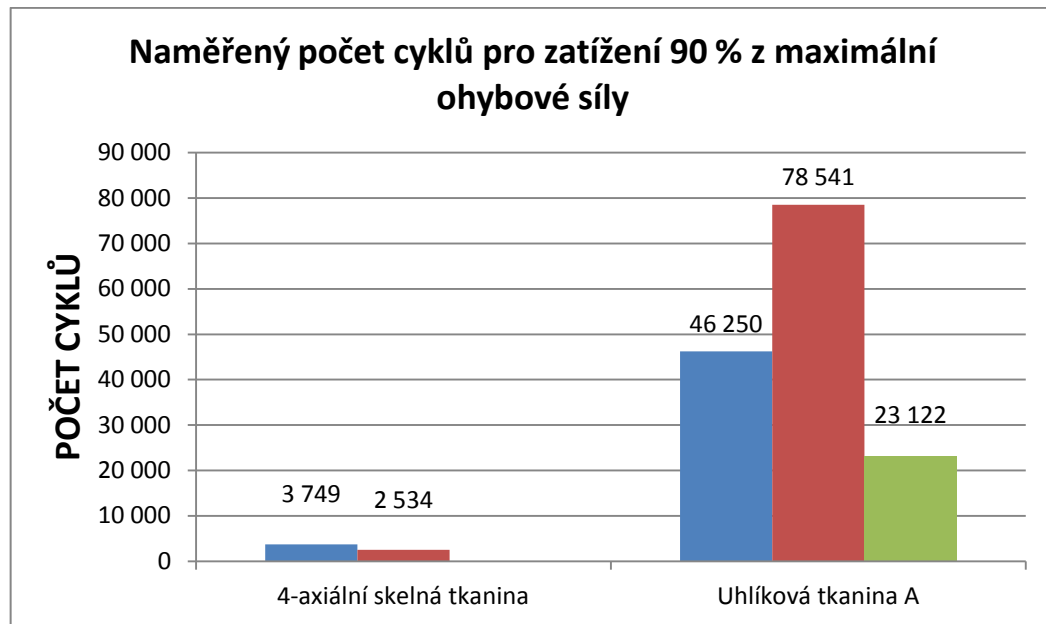


Obr. 55. Srovnání počtu cyklů skelných laminátů při zatížení 90%

8.3 Srovnání uhlíkových kompozitů se skelnými lamináty

8.3.1 4-axiální skelná tkanina a uhlíková tkanina A

Z naměřených hodnot plyne, že zkušební tělesa z materiálu kordcarbon A měly výrazně vyšší odolnost proti únavě, než tělesa z materiálu skelné 4-axiální tkaniny. Cyklické zkoušky probíhaly při zatížení 80 % a 90 % maximální ohybové síly, kde při 90 % vydržely kordcarbonové tělesa několikanásobně větší počty cyklu, než došlo k přelomení zkušebního tělesa (Obr. 56). Při zatížení 80 % maximální síly snesly kordcarbonová tělesa A 150 000 cyklů, aniž by došlo k jejich porušení, zatímco tělesa ze skelné 4-axiální tkaniny praskly při tomto zatížení průměrně při 13 000 cyklech.



Obr. 56. Srovnání počtu cyklů skelných a uhlíkových laminátů při zatížení 90 %

Jak už bylo zmíněno, materiál z 4-axiální skelné tkaniny se používá na pružinu pro skákací boty. Sklolaminátové pružiny časem měknou, čímž pružina ztrácí své vlastnosti a nelze pak skákat s těmito botami tak vysoko. Tento materiál byl testován na cyklické namáhání pro srovnání s uhlíkovými lamináty. Někteří výrobci již vyrábí sklolaminátové pružiny s příměsí karbonových vláken pro zlepšení vlastností pružiny. Do budoucna je zde předpoklad nahrazení sklolaminátových pružin pružinami s karbonovými vlákny, či jejich kombinace, a tím dosažení vyšší životnosti pružiny a také nižší hmotnosti. Omezujícím faktorem je zde však cena uhlíkových vláken, jež je mnohonásobně vyšší než cena skleněných vláken.

8.3.2 Skelný prepreg a uhlíková tkanina

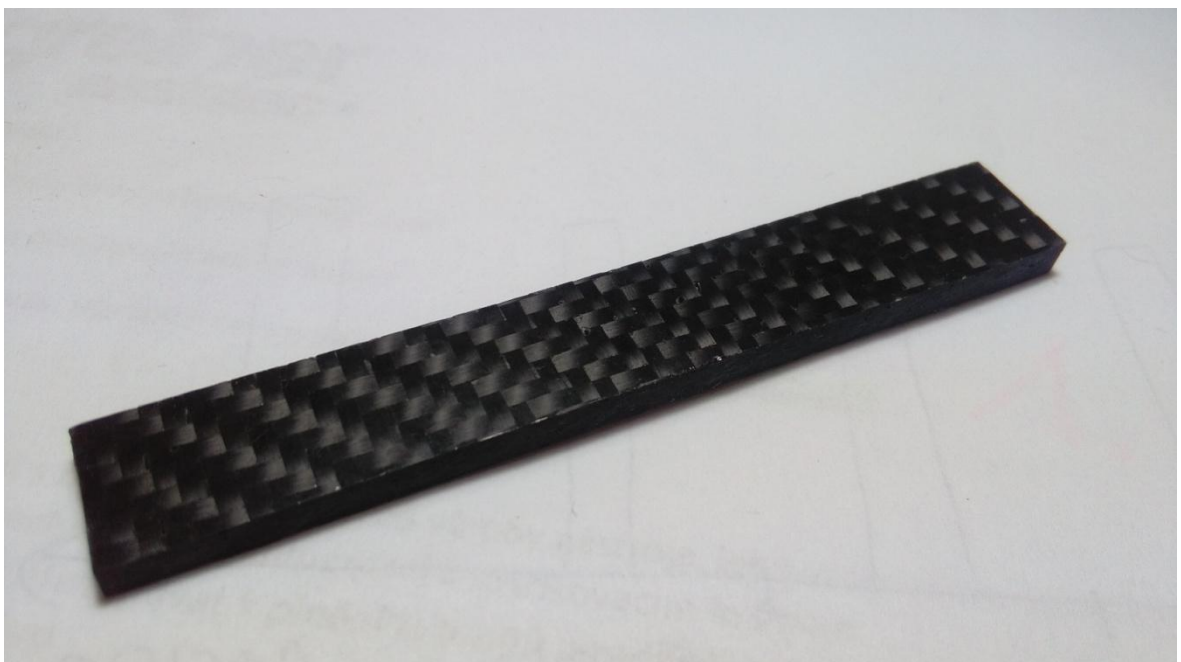
Zkušební tělesa ze skelného prepregu prokázaly poměrně dobrou únavovou životnost nejen oproti tělesům ze 4-axiální skelné tkaniny, ale také ve srovnání se vzorky z uhlíkové tkaniny. Při zatížení 80 % z maximální ohybové síly vydržely tyto vzorky průměrně 98 800 cyklů, zatímco tělesa z uhlíkové tkaniny A odolaly tomuto zatížení 150 000 cyklů bez porušení zkušební tělesa.

Dalším rozdílem mezi těmito materiály byla viditelná plastická deformace u zkušebních těles ze skelného prepregu po několika desítkách tisíc cyklů, zatímco u těles z uhlíkové tkaniny nebyly viditelné žádné změny ani po 150 000 cyklech. Na obrázku 57. je vidět deformace zkušební tělesa ze skelného prepregu po 50 000 cyklech. Na obrázku 58.

je pro srovnání zobrazen vzorek z uhlíkové tkaniny po 150 000 cyklech. Zatížení bylo pro oba vzorky 80 % $F_{o_{max}}$.



Obr. 57. Deformace zk. tělesa ze skelného prepregu po 50 000 cyklech



Obr. 58. Zk. těleso z uhlíkové tkaniny po 150 000 cyklech bez poškození

Laminát ze skelného prepregu byl použit pro výrobu listové pružiny. Nahrazením běžných ocelových pružin, pružinou sklolaminátovou, lze uspořit až 70 % hmotnosti. Výsledky naznačují, že s rostoucím počtem cyklů sklolaminátová pružina ztrácí své vlastnosti a po-

stupně s přibývajícím počtem cyklů měkne. Místo sklolaminátu by bylo možné použít kompozit z uhlíkového vlákna, čímž by bylo dosaženo vyšší odolnosti proti únavě. Opět zde však hraje velkou roli cena uhlíkových vláken, jež je mnohem vyšší, než cena skleněných.

ZÁVĚR

Cílem diplomové práce bylo ověřit odolnost proti únavovému namáhání kompozitních materiálů na bázi Kordcarbon tkaniny a následně porovnat s únavovým chováním skelných laminátů. Pro zkušební tělesa z uhlíkového kompozitu byly použity dva typy Kordcarbon tkaniny s různou gramáží a pro sklolaminátové zkušební tělesa taktéž dva druhy skelné tkaniny. Únavové zkoušky byly provedeny pro dvě úrovně zatížení.

Nejprve byla provedena zkouška tříbodovým ohybem pro stanovení základních materiálových vlastností cyklicky nezatížených těles. Z maximální ohybové síly pak mohly být stanoveny úrovně zatížení, při kterých cyklické zkoušky probíhaly. Všechny cyklické zkoušky byly provedeny při vysokých úrovních zatížení, 80 % a 90 % z maximální ohybové síly jednotlivých zkušebních těles. Z důvodu velké časové náročnosti těchto cyklických zkoušek byl maximální počet naměřených cyklů 150 000. Pokud nedošlo k přelomení vzorku během tohoto počtu cyklů, byla následně provedena opět statická zkouška tříbodovým ohybem pro zjištění, zda došlo k poklesu pevnosti materiálu.

Nejlepší výsledky vykazovala zkušební tělesa z Kordcarbon tkaniny A, jenž vydržely bez poškození 150 000 cyklů při zatížení 80 % z maximální ohybové síly. Statická zkouška ohybu těchto cyklicky zatížených těles prokázala, že zde došlo k úbytku modulu pružnosti jen o 15%. Při zatížení 90 % z maximální ohybové síly snesly vzorky z uhlíkové tkaniny A největší počet cyklů 78 541 a nejmenší počet cyklů 23 122. Tento rozptyl počtu cyklů je poměrně velký a může být způsoben vadami ve struktuře materiálu, jako jsou například bubliny nebo nedostatečné prosycení pryskyřicí v některých místech vzorku. Zkušební tělesa z Kordcarbon tkaniny B neprokázaly zdaleka tak dobré výsledky jako vzorky z Kordcarbon tkaniny A, jelikož vydržely při zatížení 90 % z maximální ohybové síly v průměru jen 6500 cyklů. Na těchto tělesech však byla viditelná horší kvalita vzorků, zejména nedostatečné prosycení pryskyřicí. Z toho plyne že únavová životnost kompozitních materiálů je mimo jiné velmi závislá taktéž na kvalitě technologie výroby.

Pro srovnání byly provedeny také únavové zkoušky dvou typů sklolaminátů použitých pro výrobu pružin. Zkušební tělesa z 4-axiální skelné tkaniny, použité výrobu pružiny na skákací boty, vydržely v průměru jen 3140 cyklů při zatížení 90 % z maximální ohybové síly a 12 900 cyklů při zatížení 80 % z maximální ohybové síly. Zkušební tělesa ze skelného prepregu použitého pro výrobu listové pružiny vydržely o hodně cyklů více v porovnání s tělesy ze 4-axiální skelné tkaniny. Při zatížení 90 % z maximální ohybové

síly to bylo v průměru 17 300 cyklů a při zatížení 80 % z maximální síly 98 800 cyklů. Zkušební tělesa ze skleného prepregu tedy vykazovaly mnohem lepší odolnost proti únavě. U obou sklolaminátů docházelo v průběhu zkoušek k plastickým deformacím. Zatímco u zkušebních těles z uhlíkové tkaniny nebyly znát žádné deformace ani po 150 000 cyklech, u sklolaminátových těles bylo viditelné prohnutí zkušebních těles již po několika tisících cyklech. Při aplikaci těchto poznatků na pružiny, je zřejmé, že sklolaminátové pružiny s přibývajícím počtem cyklů měknou a ztrácí své pružící vlastnosti. Pro náročné aplikace, kde je požadavek na vysoké počty cyklů při vysokém zatížení, je vhodné použít uhlíkové kompozity, které se jeví jako velmi vhodný materiál odolávající únavě. Zároveň je třeba klást důraz na kvalitu a technologii výroby, jelikož ta má na životnost daného výrobku velký vliv. Na závěr je třeba říct, že hlavní roli v použití uhlíkových kompozitů, hraje především jejich vysoká cena ve srovnání s ostatními materiály.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] BELINGARDI, G., M.P. CAVATORTA a FRASCA. Bending fatigue behavior of glass-carbon/epoxy hybrid composites. *Department of Mechanical Engineering* [online]. Itálie, 2005, 11 s. [cit. 2016-04-28].
Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0266353805001417>
- [2] BRUNBAUER, Julia, Hannes STADLER a Gerald PINTER. *Mechanical properties, fatigue damage and microstructure of carbon/epoxy laminates depending on fibre volume content* [online]. Rakousko: University of Leoben, 2014, , 8 s. [cit. 2016-04-28].
Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0142112314002126>
- [3] DAĐOUREK, Karel. *Kompozitní materiály - modely a vlastnosti*. Vyd. 1. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2005, 55 s. ISBN 80-7083-972-4.
- [4] *Duratec.cz* [online]. [cit. 2016-04-28].
Dostupné z: <http://www.duratec.cz/cs/techinfo/pouzivane-materialy/uhlikova-vlakna-karbonove-kompozity/>
- [5] EHRENSTEIN, Gottfried W. *Polymerní kompozitní materiály*. V ČR 1. vyd. Praha: Scientia, 2009, 351 s. ISBN 978-80-86960-29-6.
- [6] GRELLMANN, Wolfgang a Sabine SEDLER. *Polymer teting*. Cincinnati, Ohio: Hanser Gardner Publications, 2007, xxxii, 674 s. ISBN 978-1-56990-410-7.
- [7] *GSM Composites: Výrobky a aplikace* [online]. [cit. 2016-05-05].
Dostupné z: <http://gms-composites.com/vyroba-karbon-kevlar.php?id=lexus-ls-200-tuning&image=0>
- [8] HARRIS, Bryan. *Fatigue in composites: science and technology of the fatigue response of fibre-reinforced plastics*. Boca Raton: CRC Press, 2003, xxi, 742 p. ISBN 185573608x.
- [9] *Havel Composites* [online]. [cit. 2016-04-28]. Dostupné z: <http://www.havel-composites.com/clanky/4-Technologie/76-Technologie-jejichpopis-ascemata.html>
- [10] *Hopsej.cz* [online]. [cit. 2016-04-28].
Dostupné z: <http://www.hopsej.cz/c/sedmimilove-skakaci-boty>
- [11] HUŠEK, Josef. Nová generace lisů pro vláknité kompozitní materiály. *Průmyslové spektrum* [online]. [cit. 2016-04-28].

- Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/nova-generace-lisu-pro-vlaknite-kompozitni-materialy.html>
- [12] JANČÁŘ, Josef. *Úvod do materiálového inženýrství polymerních kompozitů*. Vyd. 1. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2003, 194 s. ISBN 80-214-2443-5.
- [13] *Kolo.cz: Vybíráme kolo* [online]. [cit. 2016-05-05].
Dostupné z: <http://kolo.cz/clanek/potrebuji-na-kole-karbonovy-ram/kategorie/rady-vybirame-kolo>
- [14] *Kompozity* [online]. [cit. 2016-04-28]. Dostupné z: <http://mujweb.cz/zkorinek/>
- [15] Kordcarbon: Uhlíkové vlákno. *Kordcarbon.cz* [online]. [cit. 2016-04-28].
Dostupné z: http://www.kordcarbon.cz/uhlikove_vlakno
- [16] KRÁL, Michal. *Únava vlákniny vyztužených kompozitů s polymerní maticí* [online]. Praha, 2014 [cit. 2016-04-28]. Prezentace. Výzkumný a zkušební letecký ústav, a.s. Útvar kompozitní technologie.
Dostupné z: http://www.csm-kompozity.wz.cz/Prezentace_UTAM.pdf
- [17] KRATOCHVÍL, Bohumil, Václav ŠVORČÍK a Dalibor VOJTĚCH. *Úvod do studia materiálů*. Vyd. 1. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická, 2005, 190 s. ISBN 80-7080-568-4.
- [18] *New Large Aircraft Composite Fire Fighting* [online]. [cit. 2016-05-02].
Dostupné z: <http://www.airporttech.tc.faa.gov/Airport-Safety/Operation-of-New-Large-Aircraft/New-Large-Aircraft-Composite-Fire-Fighting>
- [19] RŮŽIČKA, Milan a Jiří FIDRANSKÝ. *Pevnost a životnost letadel*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2000. ISBN 80-01-02254-4.
- [20] ŠUBA, Oldřich. *Mechanika polymerů a kompozitů*. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, Academia centrum, 2011. ISBN 978-80-7454-015-8.
- [21] VAN PAEPEGEM, W. a J. DEGRIECK. *A new coupled approach of residual stiffness and strength for fatigue of fibre-reinforced composites* [online]. Belgie: Ghent University, Department of Mechanical Construction and Production, 2001, 16 s. [cit. 2016-04-28].
Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0142112301001943>

- [22] VASSILOPOULOS, Anastasios P. *Fatigue life prediction of composites and composite structures: edited by Anastasios P. Vassilopoulos*. Oxford: Woodhead Publishing, 2010. Woodhead Publishing in materials. ISBN 1439827893.
- [23] VNOUČEK, Milan. *Kompozitní materiály* [online]. [cit. 2016-04-28]. Prezentace. Západočeská univerzita v Plzni.
Dostupné z:http://www.ateam.zcu.cz/download/kompozity09_10.pdf

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

FRC	Fiber reinforced composites
HS	High strength
HM	High modulus
GF	Glass fiber
PAN	Polyakrylonitril
SMC	Sheet molding compound
RTM	Resin transfer molding
UP	Unsaturated polymers
VE	Vinylester
EP	Epoxidová pryskyřice
R	Poměr horního a dolního napětí
AF	Aramid fiber
Hz	Hertz
μm	Mikrometr
mm	Milimetr
SiO_2	Oxid křemičitý
MgO	Oxid hořečnatý
Al_2O_3	Oxid hlinitý
CaCO_3	Uhličitan vápenatý
Hm.%	Hmotnostní procento
$\text{Al}(\text{OH})_3$	Hydroxid hlinitý
$\text{Mg}(\text{OH})_3$	Hydroxid hořečnatý
σ_D	Únavová pevnost
σ_{fM}	Mez pevnosti v ohybu

Al	Chemický prvek hliník
bar	Jednotka tlaku
g/m^2	Gram na metr čtvereční
g/m^3	Gram na metr krychlový
kN	Kilonewton
E	Modul pružnosti
$F_{0\text{max}}$	Maximální ohybová síla
MPa	Megapascal

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1. Synergické chování [17]	12
Obr. 2. Jevy na rozhraní matrice a výztuže při porušování kompozitu [17].....	13
Obr. 3. Rozdělení podle geometrického tvaru výztuže [17]	14
Obr. 4. Vliv teploty zpracování na E-modul a mez pevnosti v tahu uhlíkového vlákna [5]	15
Obr. 5. Typy tkanin používaných jako výztuže v laminátech [12].....	16
Obr. 6. Příklad vrstvení jednotlivých lamin [20]	21
Obr. 7. Průběh poškozování homogenních a vláknových materiálů [5].....	23
Obr. 8. Rozvoj typů poškození během života zkušebního kompozitního tělesa [16].....	24
Obr. 9. Srovnání únavových vlastností kompozitů - epoxidová pryskyřice a různé druhy vláken [5]	25
Obr. 10. Oblasti cyklického zatěžování [5]	26
Obr. 11. Průběhy zatěžovací křivky.....	27
Obr. 12. Pokles tuhosti jako kritérium únavy (kompozit z epoxidové pryskyřice vyztužený uhlíkovými vlákny) [5]	28
Obr. 13. Rozměry zkušebních vzorků podle metody D3479[8]	29
Obr. 14. Únavové chování kompozitů - srovnání [4]	31
Obr. 15. Podíl uhlíkových materiálů na Boeingu 787 Dreamliner [18]	32
Obr. 16. Karbonový nárazník [7].....	33
Obr. 17. Karbonový rám [13]	33
Obr. 18. Schéma ručního kladení [9].....	34
Obr. 19. Lisování pomocí vakua [9]	35
Obr. 20. Zařízení pro výrobu SMC polotovarů [5].....	36
Obr. 21. Lis pro SMC materiály [11].....	37
Obr. 22. Technologie RTM [9].....	38
Obr. 23. Schéma pultruze [9].....	39
Obr. 24. Schéma navíjení [9].....	40
Obr. 25. Schéma vazby kepr [12]	42
Obr. 26. Separace povrchu formy	43
Obr. 27. Stříhání uhlíkové tkaniny.....	44
Obr. 28. Míchání epoxidové pryskyřice a tužidla.....	45
Obr. 29. Nanášení epoxidové směsi.....	46

Obr. 30. Pila s diamantovým kotoučem.....	47
Obr. 31. Nařezaná zkušební tělesa.....	47
Obr. 32. Lisování pomocí vakua.....	48
Obr. 33. Skákací boty Poweriser [10].....	48
Obr. 34. Uspořádání jednotlivých vrstev sklolaminátové pružiny	49
Obr. 35 Zkušební stroj ZWICK 1456	50
Obr. 36. Průběh statické zkoušky v ohybu na stroji ZWICK 1456	51
Obr. 37. Závislost napětí na poměrné deformaci.....	52
Obr. 38. Závislost napětí na poměrné deformaci.....	53
Obr. 39. Závislost napětí na poměrné deformaci.....	54
Obr. 40. Závislost napětí na poměrné deformaci.....	55
Obr. 41. Zkušební stroj INSTRON 8871	56
Obr. 42. Uspořádání cyklické ohybové zkoušky	56
Obr. 43. Sinusový průběh zatížení.....	57
Obr. 44. Srovnání modulu pružnosti před a po cyklování pro zk. tělesa z kordcarbon tkaniny A	60
Obr. 45. Srovnání meze pevnosti před a po cyklování pro zk. tělesa z kordcarbon tkaniny A	61
Obr. 46. Srovnání modulu pružnosti před a po 150 000 cyklech	62
Obr. 47. Srovnání meze pevnosti před a po 150 000 cyklech	62
Obr. 48. Vady vzorku - nedostatečné prosycení pryskyřicí.....	64
Obr. 49. Srovnání modulu pružnosti před a po 70000 cyklech	65
Obr. 50. Srovnání meze pevnosti v ohybu před a po 70000 cyklech	65
Obr. 51. Wöhlerova křivka - tělesa ze skelného prepregu.....	67
Obr. 52. Wöhlerova křivka - tělesa z 4-axiální skelné tkaniny.....	68
Obr. 53. Srovnání počtu cyklů pro zkušební tělesa z uhlíkové tkaniny A a B	69
Obr. 54. Srovnání počtu cyklů skelných laminátů při zatížení 80 %.....	70
Obr. 55. Srovnání počtu cyklů skelných laminátů při zatížení 90%.....	71
Obr. 56. Srovnání počtu cyklů skelných a uhlíkových laminátů při zatížení 90 %.....	72
Obr. 57. Deformace zk. tělesa ze skelného prepregu po 50 000 cyklech	73
Obr. 58. Zk. těleso z uhlíkové tkaniny po 150 000 cyklech bez poškození	73

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1. Doporučený počet zkušebních těles pro různé požadavky na data [8].....	29
Tabulka 2. Specifikace pryskyřice L285 a tužidla 285.....	44
Tabulka 3. Parametry stroje ZWICK 1456.....	50
Tabulka 4. Základní materiálové charakteristiky zk. těles z Kordkarbon tkaniny A	51
Tabulka 5. Základní materiálové charakteristiky zk. těles z Kordkarbon tkaniny B.....	52
Tabulka 6. Základní materiálové charakteristiky zk. těles ze 4-axiální skelné tkaniny	53
Tabulka 7. Základní materiálové charakteristiky zk. těles z prepreg sklolaminátu.....	54
Tabulka 8. Parametry zatížení cyklické zkoušky zk. těles z Kodkarbon tkaniny A.....	57
Tabulka 9. Parametry zatížení cyklické zkoušky zk. těles z Kodkarbon tkaniny B.....	57
Tabulka 10. Parametry zatížení cyklické zkoušky zk. těles ze 4-axiální skelné tkaniny	58
Tabulka 11. Parametry zatížení cyklické zkoušky zk. těles z deltapreg sklolaminátu	58
Tabulka 12. Výsledky statické zkoušky cyklicky zatížených těles	59
Tabulka 13. Srovnání průměrných hodnot pro cyklicky nezatížená a zatížená tělesa	60
Tabulka 14. Výsledky statické zkoušky zk. těles po 150 000 cyklech.....	61
Tabulka 15. Srovnání průměrných hodnot cyklicky nezatížených těles a těles po 150 000 cyklech.....	62
Tabulka 16. Výsledné počty cyklů při 90 % zatížení materiálu kordcarbon A	63
Tabulka 17. Výsledné počty cyklů při 90 % zatížení zk. těles z tkaniny kordcarbon B	63
Tabulka 18. Srovnání průměrných hodnot cyklicky nezatížených těles a těles po 70 000 cyklech.....	64
Tabulka 19. Počty cyklů pro zk. tělesa ze 4-axiální skelné tkaniny	66
Tabulka 20. Počty cyklů pro zk. tělesa ze skelného prepregu	66

SEZNAM PŘÍLOH

- Příloha I: Technický list Kordcarbon CC200 T - 100
- Příloha II: Technický list Kordcarbon CC280 T4 - 100
- Příloha III: Materiálový list Deltapreg VV430U - DT806W-39
- Příloha IV: Materiálový list Delatapreg VV320P - DT806R-37
- Příloha V: Materiálový list Quadriaxial Q-E-820

PŘÍLOHA P I: TECHNICKÝ LIST KORDCARBON CC200 T - 100



Inspection Certificate 3.1

EN 10 204: 2004

Certificate No.: **C0057101**

Material Code: TOR000202
Material Designation: **CC 200 T - 100**
Manufacturing Date: 12.5.2014
Article no.: CA0004-641-0002
Test roll No.: C0057101
Finish: loomstate

Kind of material - warp: Toray 3K 200 tex
Kind of material - weft: Toray 3K 200 tex
Compatibility: Epoxi resin
Binding: twill 2/2

Results of specific tests according to Specification No.:		TOR000202				
Characteristic	Unit	Target values	Tolerance (min. - max.)		Test results	Note
Sett of warp	n/m	500	490	510	* 506	DIN EN 1049-2
Sett of weft	n/m	500	490	510	* 504	DIN EN 1049-2
Thickness	mm	0,38	0,35	0,41	* 0.40	DIN EN 5084
Area weight	g/m2	200	190	210	202	DIN EN 12127
Width	cm	100	99	101	* 100.2	DIN EN 1773
Density TOR 3K 200 tex	g/cm3	1,76				
* orientation value						
Corresponds to the batch no.: C00571						



Address of Manufacturer:

KORDÁRNA Plus a.s.
696 74 Velká nad Veličkou 890
Czech Republic

Contact of Techn. Dept.: Kučera Jiří, +420 518 312 528
+ 420 518 329 302, kuceraj@kordarna.cz

PŘÍLOHA P II: TECHNICKÝ LIST KORDCARBON CC280 T4 - 100



Inspection Certificate 3.1

EN 10 204: 2004

Certificate No.: C0061101

Material Code: TOR001501
Material Designation: **CC 280 T4 - 100**
Manufacturing Date: 0.1.1900
Article no.:
Test roll No.: C0061101
Finish: loomstate

Kind of material - warp: Toray 3K 200 tex
Kind of material - weft: Toray 3K 200 tex
Compatibility: Epoxi resin
Binding: twill 4/4

Results of specific tests according to Specification No.:		TOR001501				
Characteristic	Unit	Target values	Tolerance (min. - max.)		Test results	Note
Sett of warp1	n/m	700	695	710	* 710	DIN EN 1049-2
Sett of weft1	n/m	700	695	710	* 710	DIN EN 1049-2
Thickness	mm	0,55	0,5	0,6	* 0,52	DIN EN 5084
Area weight	g/m2	280	275	285	284	DIN EN 12127
Width	cm	100	99,5	101	* 99,5	DIN EN 1773
Density TOR 3K 200 tex	g/cm3	1,76				
* orientation value						
Corresponds to the batch no.: C00611						



Address of Manufacturer:
KORDÁRNA Plus a.s.
696 74 Velká nad Veličkou 890
Czech Republic

Contact of Techn. Dept.: Kučera Jiří, +420 518 312 528
+ 420 518 329 302, kuceraj@kordarna.cz

PŘÍLOHA P III: MATERIÁLOVÝ LIST DELTAPREG VV430U - DT806W-39

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 termoidurente/ Thermosetting epoxy
Temperatura di cura/ Cure temperature	65 ÷ 140°C
Gel time	50 ÷ 60 min @ 80°C 15 ÷ 19 min @ 100°C
Tg [Ciclo di cura]/ Tg [Cure cycle]	Ref. to DT806 technical data sheet (1)
Viscosità/ Viscosity	Bassa/ Low (2)
Trasparenza/ Transparency	Molto buona/ Very good
Stabilità all'ingiallimento/ UV stability	N.A. (vedi Trasparenza)/ N.A. (see Transparency)
Indicato per applicazioni dove siano richiesti:/ Recommended for those applications requiring:	-Indurimento a bassa temperatura/ Low temperature cure -Stampaggio rapido in pressa/ Fast press 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 IV: MATERIÁLOVÝ LIST DELTAPREG VV320P - DT806R-37

SCHEDA TECNICA DI PRODOTTO/PRODUCT TECHNICAL DATA SHEET

Codice Articolo/ Material code: PVV320P0337

Rev. 1.04 - 09/10/2014

VV320P-DT806R-37 (H 120 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)	Roving 300 tex
Stile di tessitura/ Weaving style	Tela/ Plain
Larghezza standard/ Standard width	1200 ± 5 mm (esclusa cimosa/ without selvedge)
Lunghezza standard/ Standard length	33 ± 3 m
Ordito (fili/ cm)/ Warp (ends/ cm)	5,30 ± 0,30
Trama (fili/ cm)/ Weft (picks/ cm)	5,30 ± 0,30
Peso areale fibra secca/ EAW	320 ± 20 g/m ²
Contenuto di resina/ Resin content	37 ± 3 % in peso/ by weight
Contenuto di volatili/ Volatile content	< 0.8 % in peso/ by weight (3)
Spessore lamina/ Laminate thickness	0,280 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 V: MATERIÁLOVÝ QUADRIAXIAL Q-E-820



DATASHEET

(according to EN 13473-1)

SAP-MATERIAL-NO.
30000944

TEXTILE STRUCTURE
7001689

ARTICLE DESCRIPTION
Q-E-820g/m²-1270mm

CONSTRUCTION	AREAL-WEIGHT [g/m ²]	TOLERANCE [+/--%]	MATERIAL
<i>upper sider</i>			
0 °	213	5	E-glass 600 TEX
45 °	200	5	E-glass 300 TEX
90 °	201	5	E-glass 300 TEX
-45 °	200	5	E-glass 300 TEX
<i>lower side</i>			
STITCHING:	6 g/m ²	+/- 1 g/m ²	PES 76 dtex

Stitching pattern:	tricot-warp	Gauge:	5,0
WIDTH:	1.270 mm	Total Tolerance:	5,1 %
Total areal weight:	820 g/m ²		