Únavová zkouška pružiny z polymerních kompozitních materiálů

Přemysl Kostka

Bakalářská práce
2017

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická
Ústav výrobního inženýrství
akademický rok: 2016/2017

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

Jméno a příjmení:	**Přemysl Kostka**
Osobní číslo:	**T16663**
Studijní program:	**B3909 Procesní inženýrství**
Studijní obor:	**Technologická zařízení**
Forma studia:	**prezenční**
Téma práce:	**Únavová zkouška pružiny z polymerních kompozitních materiálů**

Zásady pro vypracování:

1. **Rešerše**
2. **Vyrobit potřebný počet vzorků pružin z PKM**
3. **Navrhnout experiment**
4. **Provést statickou a dynamickou zkoušku**
5. **Vyhodnotit zkoušku**

Rozsah bakalářské práce:

Rozsah příloh:

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

Seznam odborné literatury:

Dle doporučení vedoucího

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Alexander Čapka**
Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání bakalářské práce: **2. ledna 2017**

Termín odevzdání bakalářské práce: **19. května 2017**

Ve Zlíně dne 31. ledna 2017

UNIVERZITA TOMÁŠE BATI VE ZLÍNĚ
Fakulta technologická
L.S.

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

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

Příjmení a jméno: Kostka Přemysl Obor: Technologická zařízení

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 8.5.2017 .....

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

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

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

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

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

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

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

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

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

ABSTRAKT

Cílem bakalářská práce je studium únavového chování pružiny vytvořené z kompozitních polymerních materiálů. Teoretická část slouží jako úvod do problematiky pružin a kompozitních materiálů. Další část pak definuje únavu kompozitních materiálů a charakterizuje významné parametry únavových zkoušek. Praktická část je zaměřena na popis výroby zkušebních těles a obsahuje vyhodnocení výsledků získaných měřením mechanických a únavových vlastností zkušebních těles pomocí statické a cyklické zkoušky tříbodovým ohybem.

Klíčová slova: Pružiny, kompozity, únava kompozitních materiálů, ohyb

ABSTRACT

The aim of the bachelor thesis is to study the fatigue behavior of the spring made of composite polymer materials. The theoretical part serves as an introduction to the problems of springs and composite materials. Another section defines the fatigue of composite materials and characterize important parameters of fatigue tests. The practical part is focused on describing the production of test specimens and contains the evaluation of the results obtained by measuring the mechanical and fatigue properties of the test bodies by means of a three-point static and cyclic test.

Keywords: Springs, composites, fatigue of composite materials, bending

Děkuji vedoucímu mé bakalářské práce panu Ing. Alexandru Čapkovi za odborné vedení, cenné rady a vynaložený čas, který mi věnoval během tvorby této bakalářské práce. Dále bych chtěl také poděkovat panu Ing. Milanu Žaludkovi Ph.D. za jeho čas a pomoc při realizaci statických zkoušek.

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

OBSAH

ÚVOD **9**

I TEORETICKÁ ČÁST **10**

1 PRUŽINY **11**

1.1 OCELOVÉ PRUŽINY 12

1.1.1 Historie listových pružin 12

1.1.2 Současnost listových pružin 13

1.1.3 Listové pružiny 14

1.1.4 Parabolická pružina 17

1.1.5 Progresivní odpružení 17

2 KOMPOZITNÍ MATERIÁLY **20**

2.1 DEFINICE KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ 20

2.1.1 Definice kompozitních materiálů podle MIL – NASA 20

2.2 ROZDĚLENÍ KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ 21

2.3 ROZDĚLENÍ VÝZTUŽÍ 22

2.3.1 Vláknové výztuže 22

2.3.2 Forma výztuží 23

2.4 DRUHY MATRIC 25

2.4.1 Nenasycené polymerní pryskyřice 25

2.4.2 Vinylesterové pryskyřice 25

2.4.3 Epoxidové pryskyřice 26

2.4.4 Fenolické pryskyřice 26

2.5 MECHANIKA VLÁKNOVÝCH KOMPOZITŮ 27

3 ÚNAVA KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ **28**

3.1 ÚNAVOVÉ POŠKOZENI KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ 28

3.1.1 Fáze poškození 29

3.2 ÚNAVOVÁ ZKOUŠKA 30

3.2.1 Režim zatížení 30

3.2.2 Typy zatížení 31

3.2.3 Zkušební frekvence 32

3.2.4 Průběh zatěžování 32

3.3 KŘIVKY ÚNAVOVÉHO ŽIVOTA 32

3.3.1 S – N křivky 32

3.3.2 Křivka životnosti ε_A - N_f 33

3.4 NORMALIZOVANÉ ZKUŠEBNÍ METODY 34

II PRAKTICKÁ ČÁST 35
4 PŘÍPRAVA K MĚŘENÍ 36
4.1 PŘÍPRAVA FORMY 36
4.2 PŘÍPRAVA KOMPOZITNÍHO VLÁKNA 36
4.3 PŘÍPRAVA MATRICE 37
4.4 VÝROBA DESKY 39
4.5 ZKUŠEBNÍ TĚLESA 40
5 STATICKÁ ZKOUŠKA OHYBEM 41
5.1 NAMĚŘENÁ DATA 42
6 DYNAMICKÁ ZKOUŠKA 44
6.1 POPIS CYKLICKÉHO STROJE 44
6.2 PARAMETRY CYKLICKÉ ZKOUŠKY 46
6.3 ÚNAVOVÁ ZKOUŠKA 48
7 VÝSLEDKY ZKOUŠEK 49
7.1 ZKOUŠKA PŘI 90 % ZATÍŽENÍ 49
7.2 ZKOUŠKA PŘI 70 % ZATÍŽENÍ 49
7.3 ZKOUŠKA PŘI 50 % ZATÍŽENÍ 50
7.4 S - N KŘIVKA 51
ZÁVĚR 52
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY 53
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK 55
SEZNAM OBRÁZKŮ 57
SEZNAM TABULEK 59
SEZNAM PŘÍLOH 60

ÚVOD

V dnešní době je trendem nahrazovat díly z kovových materiálů díly z kompozitu a to především v automobilovém průmyslu. Díky snížení hmotnosti automobilu má každý ušetřený kilogram vliv na menší spotřebu a tím automobil méně znečišťuje životní prostředí. V našem případě jde kromě hmotnosti i o zlepšení komfortu a jízdních vlastností.

Práce má za účel popis základních pojmů a vlastností kompozitu. Teoretická část popisuje listové pružiny, rozdělení kompozitních materiálů, proces únavového poškození vláknových kompozitů a průběh zkoušky únavy. Praktická část obsahuje výrobu vzorků pružin z kompozitních polymerních materiálů a charakteristiku použitých mechanických zkoušek.

Cílem této bakalářské práce je zjistit, jaké vydrží pružiny vyrobené z kompozitního materiálu únavové namáhání.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 PRUŽINY

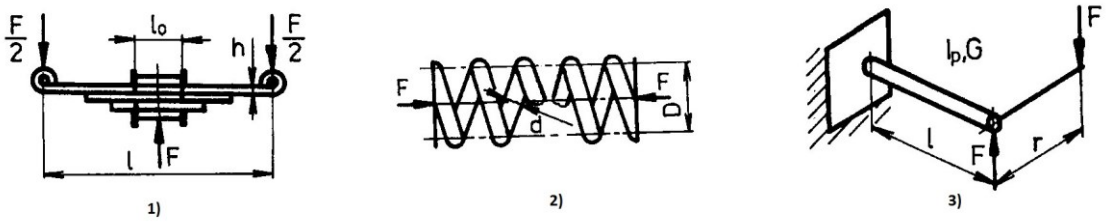
Pružiny jsou součást zavěšení, to jsou zařízení určené k akumulaci vibrací a kmitavých pohybů náprav vozidla na jeho podvozkové části a karoserii. Chrání posádku a přepravovaný náklad před nežádoucími otřesy. Odpružení také prodlužuje životnost dílů podvozku. Zajišťuje stálý styk pneumatiky s vozovkou a to i při přejíždění nerovností, kde by mohlo dojít ke ztrátě ovladatelnosti vozidla. Umožňuje taktéž přenos hnacích a brzdných sil pomocí pneumatik na vozovku a zajišťuje tak plynulost jízdy. [1]

Veličinou, která nám určuje pružení je netlumená vlastní frekvence:

$$\omega = \sqrt{\frac{c}{m}}\ [kg^{-1}] \tag{1}$$

Pružinová konstanta c závisí na použitém odpružení, na Obr. 1 jsou zobrazeny některé pružinové konstanty, které z materiálového hlediska můžeme rozdělit na následující druhy: [1]

a) Pružiny ocelové
b) Pružiny pryžové
c) Pružiny vzduchové
d) Pružiny vzduchokapalinové (hydropneumatické)
e) Pružiny pryžokapalinové (hydroelastické)



Obr. 1. Pružinové konstanty pro různé druhy ocelových pružin [1]

$$c_1 = \frac{4 \cdot n_l \cdot h^3 \cdot E}{K \cdot l^{*3}}\ [-] \tag{2}$$

$$l^* = l - \frac{2}{3} \cdot l_0\ [m] \tag{3}$$

$$c_2 = \frac{d^4 \cdot G}{8 \cdot n_z \cdot D^3}\ [-] \tag{4}$$

$$c_3 = \frac{J_p \cdot G}{l \cdot r^2}\ [-] \tag{5}$$

1.1 Ocelové pružiny

Tyto pružiny dělíme podle konstrukčního hlediska na pružiny listové, vinuté, talířové a zkrutné. Zabývat se zde budu pouze pružinami listovými.

1.1.1 Historie listových pružin

První odpružení automobilů se vyvinulo z odpružení koňských povozů a kočárů. Zde se však uplatňovalo odpružení celé kabiny pomocí vodorovně napnutých kožených pásů, toto řešení se ovšem v automobilovém průmyslu neuplatnilo. Další způsob odpružení kočárů spočíval v použití dřevěných listových per. V případě, že se však jednalo o těžký povoz, používali se listová pera vyrobená z oceli. Jeden z prvních vozů, který měl listové pružiny byl i NW Präsident (1897) české výroby. Prvním automobilem, který měl listové pružiny podobné těm dnešním byl Ford T (1908). Listové pružiny se ve velké míře začali používat v nákladních automobilech a to díky jejich vlastnostem při zatížení. [2], [3]

Obr. 2. NW Präsident 1897 [2]

Obr. 3. Ford T 1908 [3]

1.1.2 Současnost listových pružin

V dnešní době se začaly vyrábět listové pružiny z kompozitního materiálu. Jeden z prvních sériově vyráběných automobilů, který takovou pružinu má je Volvo XC90. Jedná se o příčnou listovou pružinu z kompozitního materiálu vyztuženého vlákny, které nahrazuje obvyklé vinuté pružiny. V porovnání se standardní koncepcí s vinutými pružinami došlo ke snížení hmotnosti zadního zavěšení o 4,5 kilogramu. Další výhody spočívají v optimalizaci jízdních vlastností a snížení úrovně vibrací a hluku. [4]

Obr. 4. Zadní příčná kompozitní listová pružina Volvo XC90 [4]

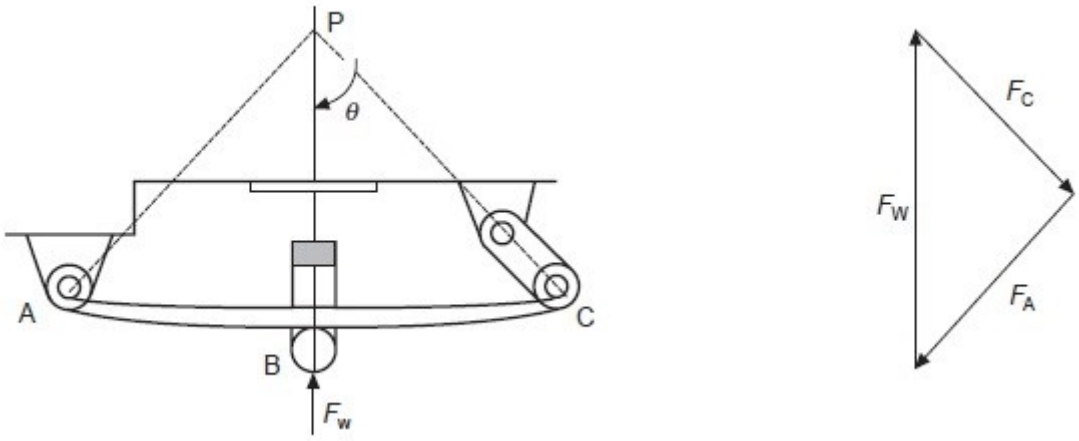
1.1.3 Listové pružiny

Listové pružiny jsou jednoduché a zároveň je to robustní forma odpružení. Je široce používána v těžkých a velmi náročných aplikacích, jako jsou například nákladní automobily.

Obr. 5. Listová pružina [6]

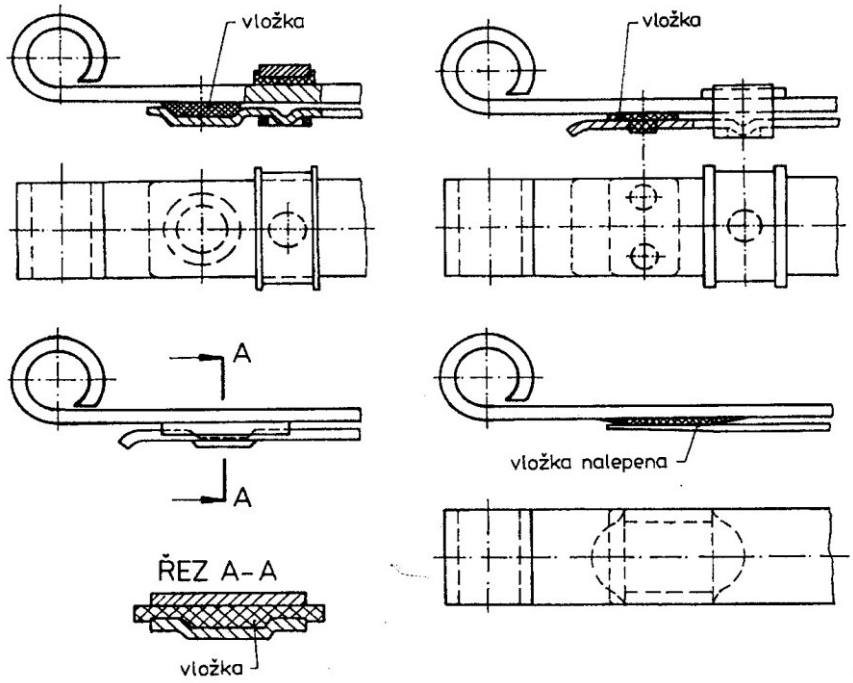
Listová pružina je tvořena z plátů pružné oceli, které jsou na sebe naskládány a spojeny třmeny, tvoří tak svazek. Z důvodu minimální hmotnosti je potřeba vytvořit listovou pružinu jako nosník stálé pevnosti, tzn. ve všech příčných řezech je pružina stejně namáhána. Listové pružiny se umisťují v rovnoběžných rovinách s podélnou rovinou vozidla. Protože při propružení mění listová pružina svoji délku, jeden konec je obvykle uchycen otočně a druhý tak, aby mohl po propružení vymezit délkové rozdíly (vykyvuje se na pomocném třmenu nebo klouže v kluzně opoře). Na obou koncích pružiny se obvykle nacházejí závěsná oka, tato oka jsou vytvořena svinutím jednoho nebo dvou nejdelších listů. V těchto okách jsou následně zalisována pryžová válcová pouzdra s otvorem pro čep, který je uchycen na nápravě popřípadě na výkyvném třmenu. [1]

Zatížení pružiny může být stanoveno s ohledem na síly, které působí na pružinu a na třmen v důsledku zatížení kola. Pružina je členem tři sil F_A, F_W a F_C. Zatížení F_W je vertikální, směr F_C je rovnoběžný do třmenu. Směr F_A musí projít průsečíkem síly F_W a F_C (bod P) pro spojení být v rovnováze. Znalost velikosti zatížení umožňuje další dvě síly, které mají být stanoveny. Tuhost pružiny je určena počtem, délky, šířky a tloušťky listů. [5]



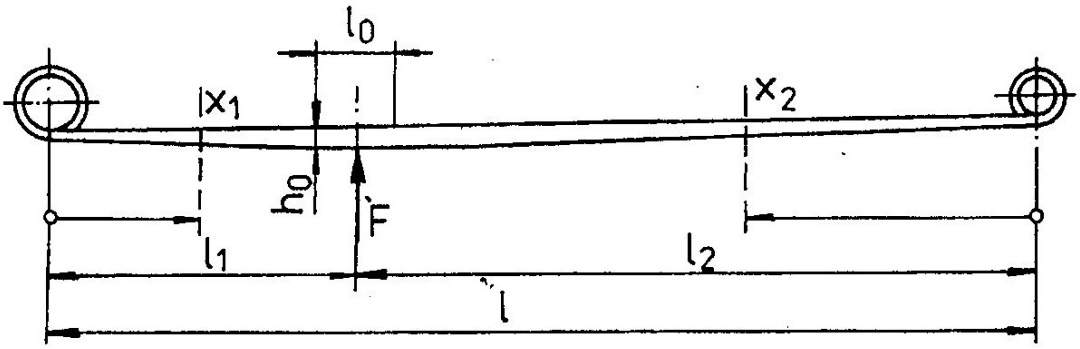
Obr. 6. Listová pružina v zatížení, (a) zatížení kola, (b) působící síly [5]

Při propružení vzniká vzájemný podélný posuv mezi jednotlivými listy pružiny a tím vzniká tření na styčných plochách. To se projevuje zvýšeným odporem pružiny proti deformaci. Jde zde o suché tření, které je nežádoucí. Z důvodu snížení tohoto tření na co nejmenší mez se dříve listové pružiny mazali. V dnešní době se používají vložky z plastů. Vložky se umisťují na konce jednotlivých listů popřípadě do středu pružiny. Jak je zobrazeno na Obr. 7. Díky tomuto procesu se takřka zamezí suchému tření. [1]



Obr. 7. Možnosti upevnění plastických vložek [1]

Z důvodu nežádoucího suchého tření by listové pružiny měli mít co nejmenší počet plátů. Ideálně by měla mít pouze jeden plát tzv. jednolistová pružina. Aby dosáhla při konstantní šířce vlastností nosníku stálé pevnosti, musí být na obou stranách vyválcována do parabolického tvaru.[1]



Obr. 8. Jednolistová pružina s parametry [1]

Rovnice výpočtu tloušťky listu v místě vetknutí. [1]

$$h_0 = \sqrt{\frac{6 \cdot F_{max} \cdot g_1 \cdot g_2}{\sigma_{dov} \cdot b \cdot (g_1 \cdot g_2)}}\ [m] \tag{6}$$

$$g_1 = l_1 - \frac{l_0}{4}\ [m] \tag{7}$$

$$g_2 = l_2 - \frac{l_0}{4}\ [m] \tag{8}$$

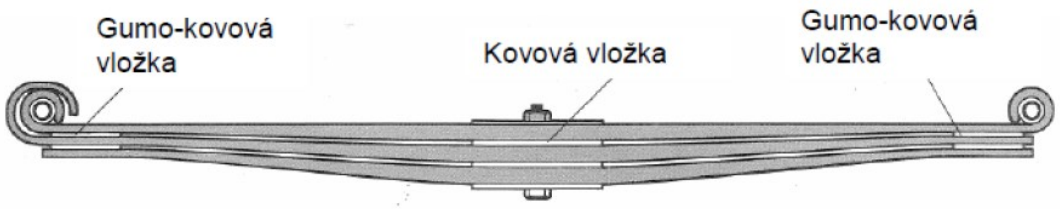
Tloušťka listu h_x na libovolném místě ve vzdálenosti x_1 popřípadě x_2 je pak

$$h_{x1} = \sqrt{\frac{x_1}{g_1}}\ [m] \tag{9}$$

$$h_{x2} = \sqrt{\frac{x_2}{g_2}}\ [m] \tag{10}$$

1.1.4 Parabolická pružina

Tato pružina odpovídá svým tvarem téměř ideálnímu nosníku stálé rovnosti. To se hlavně projeví na menší hmotnosti při stejném zatížení v porovnání s konvekčními listovými pružinami. U nákladních automobilů, které jsou více zatěžovány, se používají pružiny složené z několika (obvykle 2 až 3) listů a přitom má stejné přednosti jako listová pružina. [1]

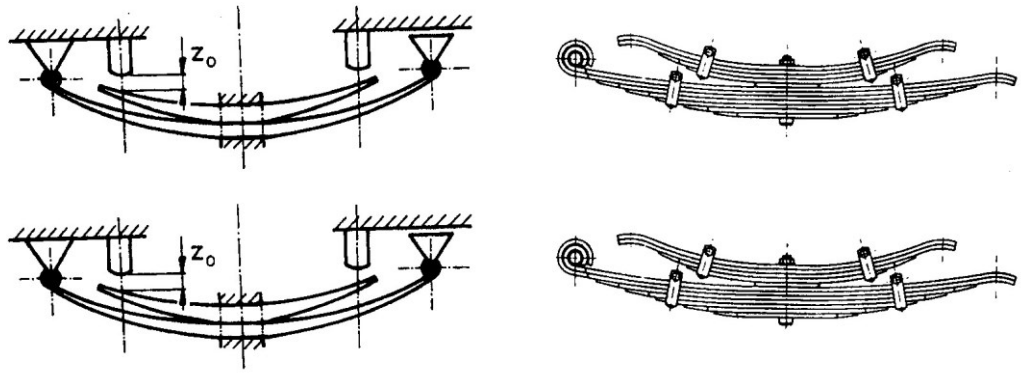


Obr. 9. Parabolická pružina [6]

1.1.5 Progresivní odpružení

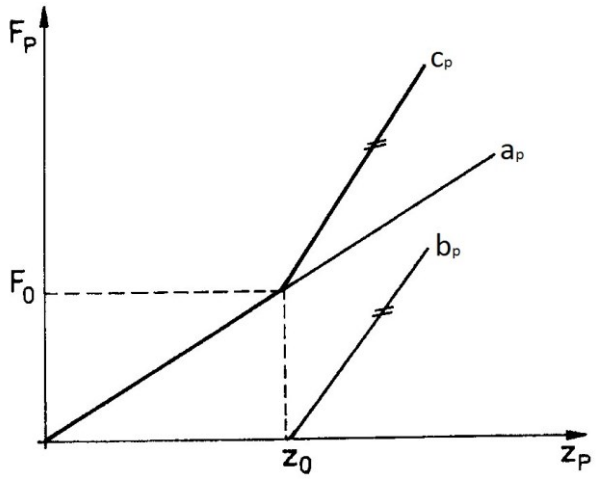
Listové pružiny mají lineární závislost průhybu pružiny na zatížení. Frekvence svislého kmitání však s rostoucím zatížením klesá. U nákladních automobilů je konstrukce upravena tak, aby při jízdě bez zatížení nebylo odpružení příliš tvrdé a při jízdě s plným zatížením nebylo příliš měkké. Takto upravené odpružení se nazývá progresivní.

Progresivní účinek může být stupňovitý nebo plynulý. Stupňovité charakteristiky se dosáhne přidáním stupňovité pružiny (hlavní listová pružina + přídavná listová pružina). Hlavní list umožňuje změnu délky při propružení. Jelikož dochází k velkému rozdílu mezi prázdným a plným vozidlem, proto se u nákladních automobilů používají přídavné pružiny. U prázdného vozidla je přídavná pružina mimo činnost. [1]



Obr. 10. Schéma a konstrukční provedení listové pružiny s přídavnou pružinou [1]

Hlavní listová pružina má lineární charakteristiku, přidáním stupňovité pružiny se tato charakteristika po určitém zdvihu z_o změní. Při síle F_o dosedne přídavná pružina na opěry a proto má výsledná charakteristika lomený tvar.



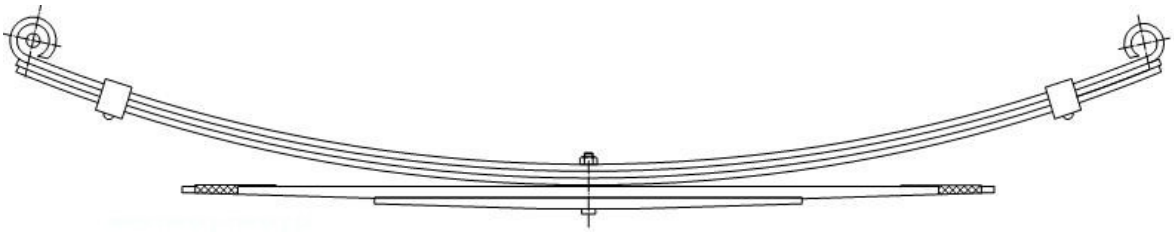
a_p – charakteristika hlavní pružiny

b_p – charakteristika přídavné pružiny

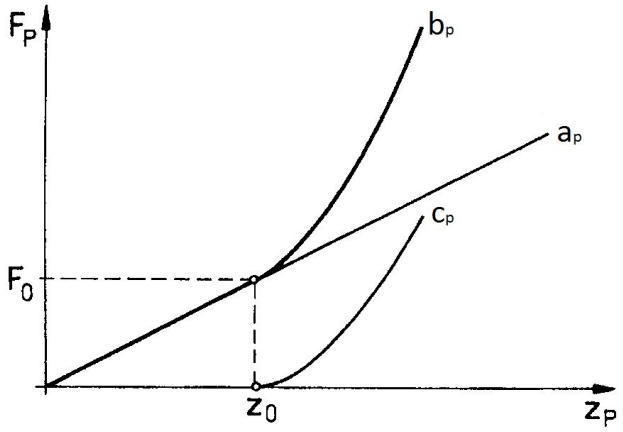
c_p – výsledná charakteristika

Obr. 11. Deformační charakteristika listové pružiny s přídavnou listovou pružinou [1]

Dalším způsobem progresivního odpružení je listová pružina s přídavným listem. Krátký nezakřivený list na spodní straně listové pružiny není u nezatíženého vozidla v činnosti. Při určité deformaci pružiny ovšem tento list postupně dosedne na sousední list svojí plochou. Od této polohy se přídavný list deformuje společně s celou pružinou. Díky přidání tohoto listu se tuhost pružiny zvýší. [1]



Obr. 12. Listová pružina s přídavným listem [7]



a_p – charakteristika hlavní pružiny

b_p – charakteristika přídavného listu

c_p – výsledná charakteristika

Obr. 13. Deformační charakteristika listové pružiny s přídavným listem [1]

2 KOMPOZITNÍ MATERIÁLY

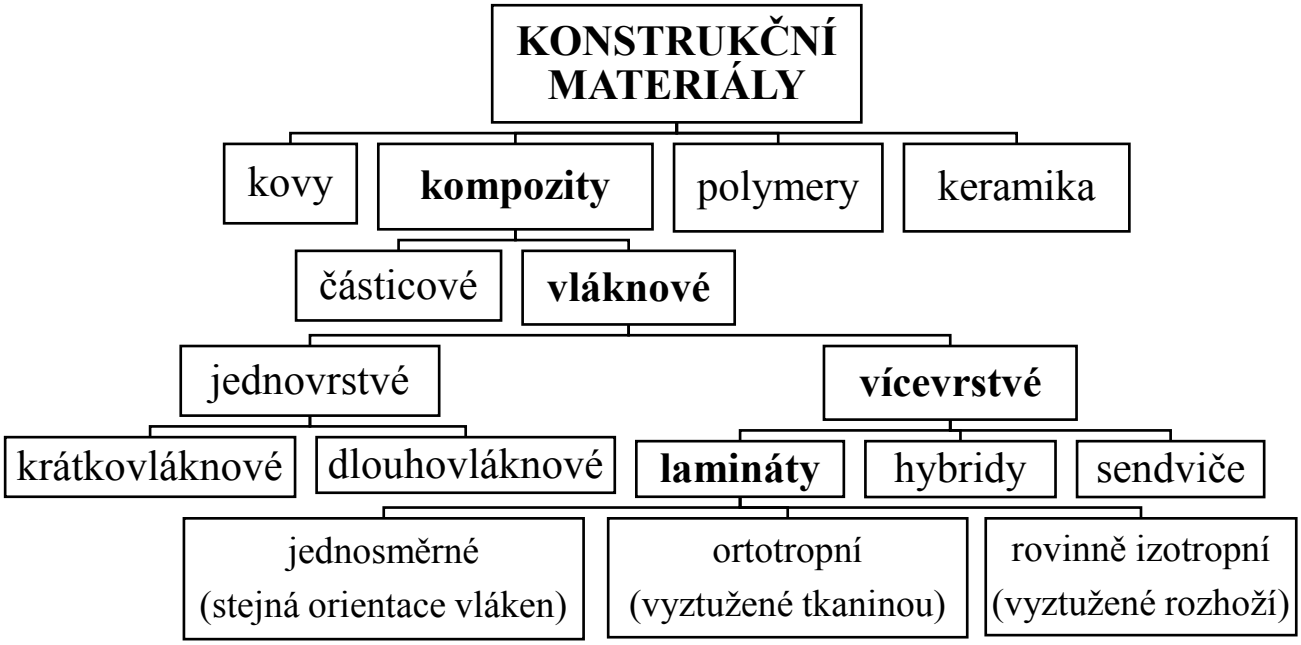
2.1 Definice kompozitních materiálů

Kompozitní materiály jsou složené ze dvou a více fází, které se vzájemně liší svými mechanickými, fyzikálními a chemickými vlastnostmi. Jedna z fází je spojitá a zastává funkci pojiva, nazývá se matrice. Pevnější nespojitá fáze, která je tužší a tvrdší se nazývá výztuž. V porovnání s matricí jsou mechanické vlastnosti (modul pružnosti, pevnost, tvrdost atd.) výztuže výrazně lepší než vlastnosti matrice. Hlavním cílem výztuže je zlepšení vlastností kompozitu. Pro kompozitní materiály je charakteristická vlastnost tzv. synergismus. To znamená, že vlastnosti kompozitu jsou lepší, než by odpovídalo pouhému sečtení vlastností jednotlivých složek. Synergismus je velmi významný, protože vede k získání materiálů kvalitativně nových vlastností. Synergismus můžeme definovat jako 1+1=3 [8]

2.1.1 Definice kompozitních materiálů podle MIL – NASA

Kompozitní materiál je kombinace dvou nebo více materiálů (vyztužovací elementy, výplně a spojovací matrice), lišících se v makroměřítku tvarem nebo složením. Složky si v nich zachovávají svou identitu (tzn. vzájemně se úplně nerozpouštějí ani neslučují), ačkoliv na své okolí působí v součinnosti. Každá složka může být fyzikálně identifikována a mezi ní a dalšími složkami je rozhraní. [9]

2.2 Rozdělení kompozitních materiálů



Obr. 14. Rozdělení konstrukčních materiálů

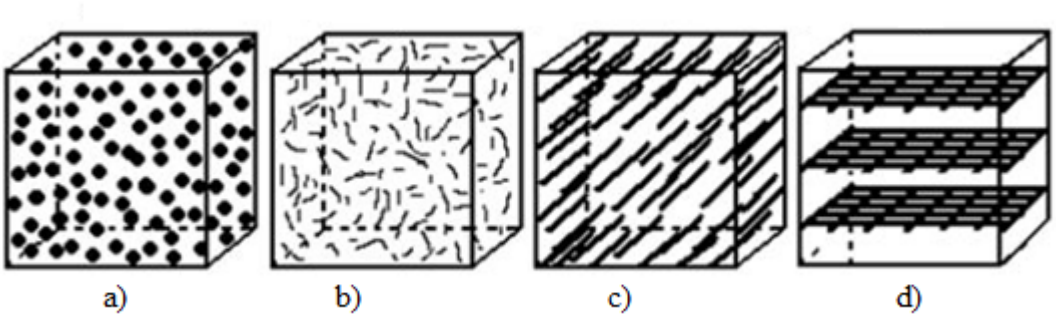
Kompozitní materiály lze rozdělit podle řady parametrů. Podle geometrického tvaru výztuže dělíme kompozity na částicové a vláknové. Jak můžeme vidět na Obr. 14.

U částicových kompozitů jsou přibližně stejné rozměry útvarů výztuže v jednotlivých směrech. Velikost jednotlivých částic se u prakticky využitelných materiálů pohybuje mezi 1-20 μm. V materiálech, které jsou určeny pro dekorativní účely je velikost částic větší až kolem 1 mm. Vyztužující částice mohou mít různé tvary např. kulovitý, destičkový, tyčinkový nebo nepravidelný. [10]

Naproti tomu u vláknových kompozitů jsou výztuže výrazně větší v jednom směru, než v ostatních směrech. Vláknové kompozity podle délky vyztužujících vláken dělíme na kompozity s krátkými vlákny a s dlouhými vlákny. Pro kompozity s krátkými vlákny je charakteristický vzorec:

$$\frac{l}{d} < 100 \tag{11}$$

U kompozitů s dlouhými vlákny je délka vláken srovnatelná s velikostí výrobku. Odolnost a pevnost jednotlivých druhů vláknových kompozitů se liší druhem a uspořádáním použitých vláken. Ve výrobcích z kompozitu má uspořádání vláken řadu variant.



Obr. 15. Rozdělení kompozitních materiálů podle geometrického tvaru výztuže a) částicový b) s krátkými vlákny c) s dlouhými vlákny s tkaninou v jednom směru d) s dlouhými vlákny s tkaninou ve více směrech [8]

2.3 Rozdělení výztuží

2.3.1 Vláknové výztuže

Pro vlákna je charakteristickou vlastností jejich výrazná anizotropie, pevnost a modul pružnosti ve směru osy je výrazně vyšší než ve směru kolmém k ose. Díky tomu mají kompozitní materiály vyšší pevnost ve směru vyztužujících vláken.[8]

Uhlíkové vlákno

Je to dlouhý tenký pramen materiálu o průměru 5-8 μm skládající se převážně z atomů uhlíku. Většina uhlíkových vláken, přibližně 90%, je vyrobena z polyakrylonitrilových vláken. Méně kvalitní a levnější uhlíková vlákna jsou vyráběna pyrolýzou zbytků po destilaci ropy, dehtu, atd. Uhlíková vlákna se řadí mezi nejperspektivnější materiály pro výztuže kompozitů s polymerními kovovými a keramickými matricemi. Jejich hlavní využití je v leteckém a automobilovém průmyslu, ale také slouží k výrobě sportovního nářadí. [11], [12]

Skelné vlákno

Skelná vlákna jsou tenká vlákna s kruhovým průřezem o průměru přibližně 4 – 24 μm. Nejčastěji používaný druh skloviny na výrobu skelných vláken je E-sklovina. Vlákna vyrobená z této skloviny jsou výborným elektrickým izolantem a mají vysokou propustnost záření. Modul pružnosti v tahu skelných vláken představuje přibližně jednu třetinu hodnoty oceli. Pevnost v tahu je ovšem větší než u většiny organických a anorganických vláken a podstatně vyšší než u ocelí. Skelné vlákno je nejčastěji používanou výztuží ve vláknových kompozitech. [13]

Aramidové vlákno

Tyto vlákna jsou na bázi lineárních organických polymerů, jejichž kovalentní vazby jsou orientovány podle osy vlákna. Mezi hlavní přednosti těchto vláken patří vysoká pevnost a tuhost. [13]

2.3.2 Forma výztuží

Na kompozitní výrobky jsou kladeny požadavky týkající se namáhání ve více směrech z technologických důvodů není výhodné vrstvení jednosměrných lamin, jako výztuže jsou používány rovingy, rohože a tkaniny. [10]

Roving

Forma výztuže ve tvaru nekonečných vláken bez krutu. Jejich společným znakem je pramenec tvořený jednotlivými vlákny a navinutý na cívku. [10]

Vyztužující rohož

Jedná se netkanou výztuž, která se vyrábí z nasekaných rovingů, které jsou naimpregnovány pryskyřicí nebo termoplastem a tepelně slisovány do ploché kontinuální rohože. Vyrábí se v různých plošných hmotnostech a výsledné výrobky mají v ploše kvaziizotropní vlastnosti. [10]

Povrchová rohož

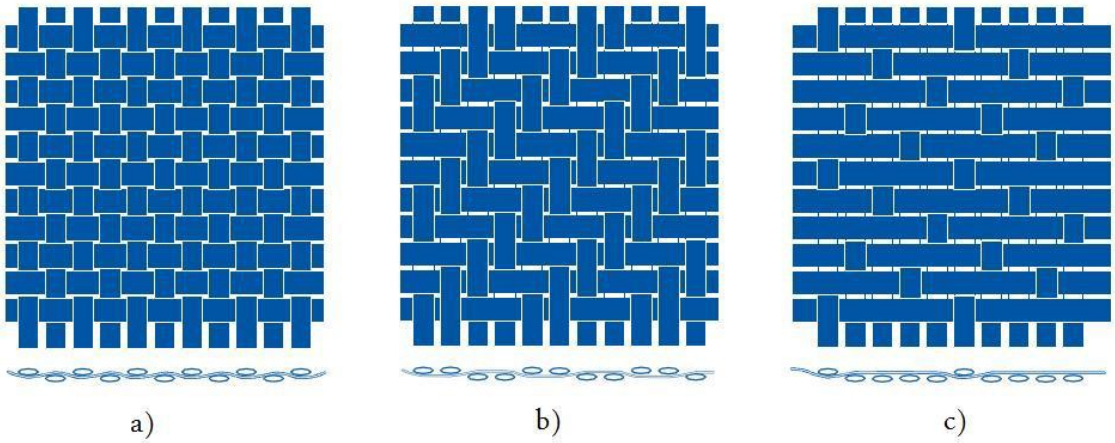
Má velmi jemnou strukturu a nízkou plošnou hmotnost. Slouží především pro estetické účely a tudíž nemá na mechanické vlastnosti kompozitního dílu žádný vliv.Jako důležitý komponent slouží povrchové rohože ke zvýšení odolnosti proti vlivům UV záření a počasí. [10]

Tkanina

Stejným způsobem jako běžné textilie se vyrábí i tkaná výztuž. Výrobky mají různou plošnou hmotnost, jsou tkány různými způsoby vazeb. Výhodou ve srovnání s netkanou výztuží má tkanina větší obsah vláken a tudíž větší tuhost a pevnost výsledného kompozitu. [10]

Uskupení tkanin

Tkaniny se skládají nejméně ze dvou parametrů, které jsou tkané společně – prameny osnovy a útku. Jsou spleteny do tří vazeb. Nejpevnější a nejméně poddajná při tvarování je vazba plátnová. Vlastnosti jsou v podélném i příčném směru stejné. Kombinací vlastností dobré pevnosti a snadného tvarování se vyznačuje vazba keprová, tato vazba tvoří diagonální vzor. Nejméně pevnou vazbou je charakterizována vazba atlasová. [10]



Obr. 16. Uložení tkanin: a) Plátno b) Kepr 2/2 c) Atlas [10]

Smíšená výztuž

Ve všech těchto výrobcích lze různé typy výztuží (roving, rohož, tkanina) nebo druhu vláken (sklo, uhlík, aramid) kombinovat a vyrábět tak hybridní kompozity. Tato možnost dává materiálovému inženýrovi další stupeň volnosti při tvorbě a výrobě materiálu šitého na míru požadované aplikaci nebo výrobku. [10]

2.4 Druhy matric

Matrice v kompozitních materiálech dělíme na kovové, polymerní a keramické. Pro kovové matrice je charakteristická tvárnost a houževnatost. Nejvýznamnějšími zástupci jsou lehké slitiny hliníku, hořčíku a titanu. Keramické matrice jsou materiály lehké a většinou velmi tvrdé, ovšem poměrně křehké. Kompozity s keramickými matricemi patří mezi vysokoteplotní materiály.

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. Nejčastěji používané matrice jsou nenasycené polyestery, vinylestery, epoxidy a fenolické pryskyřice. Nevýhodou termoplastů je především velká viskozita taveniny při zpracování, která je o 2-4 řády vyšší než u reaktoplastů. To vede ke vzniku defektů při smáčení výztuže a tím ke vzniku kompozitu s nedostatečnými užitnými vlastnostmi. Pro odstranění tohoto problému je nutné používat jako vstupní surovinu termoplastem impregnovaná vlákna a to vede ke zvýšení ceny hotových kompozitních profilů. [8], [10]

2.4.1 Nenasycené polymerní pryskyřice

Jedná se o roztok lineárních nenasycených polymerů, obsahující ve svých molekulách reaktivní dvojnou C=C vazbu v polymerace schopném rozpouštědle. Tím je nejčastěji styren. Krátké ortogonální řetězce nenasycených polyesterových pryskyřic jsou v průběhu vytvrzování spojovány styrenovými můstky. Aby reakce probíhala s technologicky přijatelnou rychlostí, je nutné provádět vytvrzování za zvýšené teploty. Teplota vytvrzování je určena typem použitého iniciátoru, které se od sebe liší právě teplotou, při které je jejich rozpad maximální. [10]

2.4.2 Vinylesterové pryskyřice

Vinylestery jsou termosety velmi vhodné pro výrobu kompozitních výrobků vyztužených skleněnými a uhlíkovými vlákny. Tyto pryskyřice se výborně hodí pro náročnější aplikace, především do agresivního chemického prostředí a také pro kompozity vystavené velkému mechanickému namáhání. 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 nebo v papírenském průmyslu. [10]

2.4.3 Epoxidové pryskyřice

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 epoxidové pryskyřice 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 (okolo 2%). Tato vlastnost je výhodná pro výrobky s požadovanou přesností rozměrů a pro výrobu kompozitů, kde je důsledkem minimálního smrštění minimalizováno vnitřní pnutí i ve velkých dílcích. V porovnání s nenasycenou polymerní pryskyřicí a vinylesterovou pryskyřicí 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. [10]

2.4.4 Fenolické pryskyřice

Fenolické pryskyřice jsou termosety charakteristické vysokou tvrdostí, modulem pružnosti a malou houževnatostí. Vznikají nejčastěji jako reakční produkt při reakci fenolu s formaldehydem. Fenolické pryskyřice mohou být dvoustupňové nebo jednostupňové. Dvoustupňové pryskyřice mají molární poměr formaldehyd/fenol menší než 1 a je zde přítomen kyselý katalyzátor, který tvoří asi 90 % celkové produkce fenolických pryskyřic. Jednostupňová pryskyřice má molární poměr formaldehyd/fenol větší než 1 a reakce je katalyzována alkalickým katalyzátorem. Fenolické pryskyřice lze skladovat bez ztráty vlastností a schopnosti síťovat relativně dlouhou dobu a to přibližně 1-3 roky. 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, elektrická odolnost a nehořlavost díky které se tato pryskyřice používá v automobilovém průmyslu. [10]

2.5 Mechanika vláknových kompozitů

Mezi zásadní rozdíly u výpočtů a konstrukce pro běžné materiály (kovy, nevyztužené plasty) a vlákny vyztužené kompozity spočívá v tom, že u běžných materiálů jde o hotové materiály, zatímco u vláknových kompozitů se jedná o kombinaci dvou velmi rozdílných složek – vlákno a matrice.

Výhodou vláknových kompozitů je možnost měnit jejich pevnost a elastické vlastnosti změnou uspořádání výztuže, druhu výztuže, poměru obsahu výztuže a pojiva a technologií výroby. Záleží také na orientaci uspořádání vláken. Tímto způsobem se může efektivně vyrobit velká škála odlišných materiálů použitím stejných základních komponentů. U běžných materiálů tato možnost neexistuje popřípadě je velmi omezená.

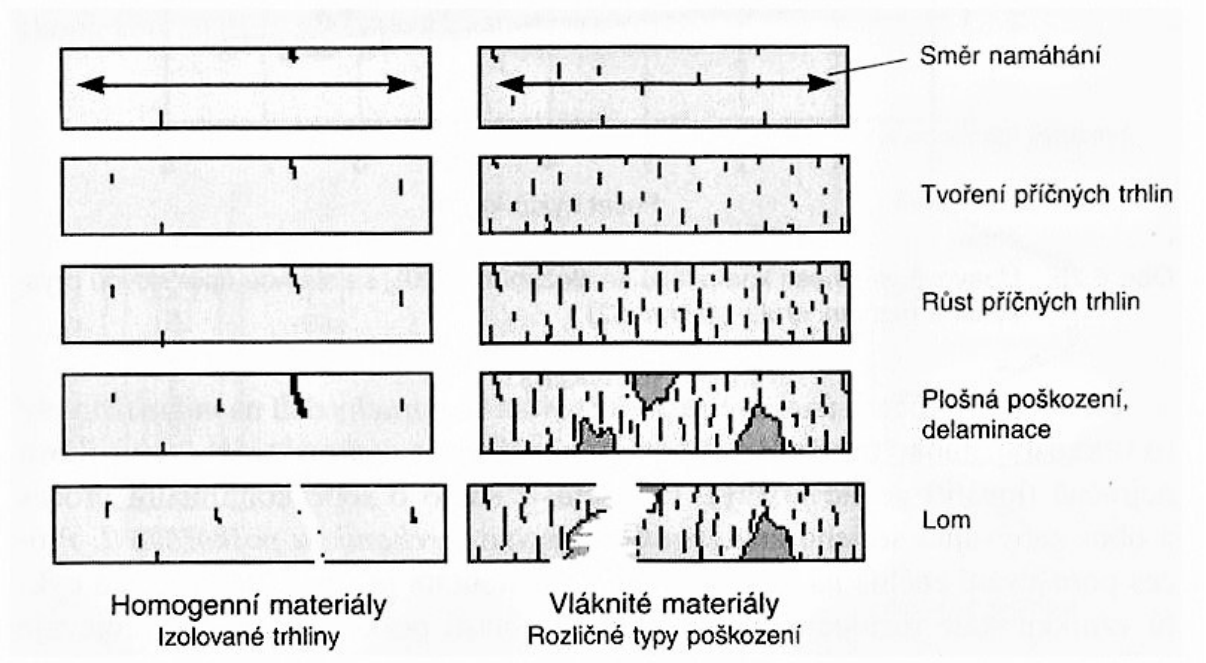
Mechanika kompozitních materiálů se zpravidla dělí na mikromechaniku a markomechaniku. Mikromechanika se zabývá výpočtem vlastností kompozitní vrstvy z odpovídajících vlastností jednotlivých komponent, informací o geometrii, uspořádání, orientaci, mezifázové adheze a objemového zlomku výztuže. Pomocí těchto výpočtů se odlaďují materiálové vlastnosti a počítají limitní faktory pro zlepšení vlastností kompozitů. Srovnání experimentálně zjištěných vlastností s teoretickými limity zjistíme, zda daný kompozit již dosáhl maxima užitných vlastností nebo ještě nebyl využit celý jeho potenciál. Makromechanika umožňuje vypočítat vlastnosti mnohovrstvého kompozitu na základě znalostí vlastností jednotlivých vrstev, údajů o počtu, tloušťce, orientaci a uspořádání kompozitní vrstvy. Mikromechanika je zanedbávána a jednotlivé vrstvy se považují za homogenní. Makromechanické výpočty se vztahují ke konkrétnímu tvaru výrobku nebo kompozitnímu profilu a způsobu namáhání. Pomocí těchto výpočtů můžeme předem eliminovat ty materiálové varianty, které jsou pro řešení našeho problému nevhodné a navrhnou ideální počet vrstev a jejich orientaci vzhledem k působícímu namáhání. [10], [13]

3 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 heterogení struktury však existuje velká rozmanitost v způsobu a průběhu porušování. U homogenních materiálů (kovy, nevyztužené plasty) se většina těchto mechanizmů poškozování nevyskytuje. [13]

3.1 Únavové poškozeni kompozitních materiálů

U kovových materiálů se při cyklickém namáhání vytvoří lokálně působící trhlina. U vláknových kompozitních materiálů 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. Růst trhliny u kompozitu může být zastaven sousedící pevnější složkou materiálu. [13]



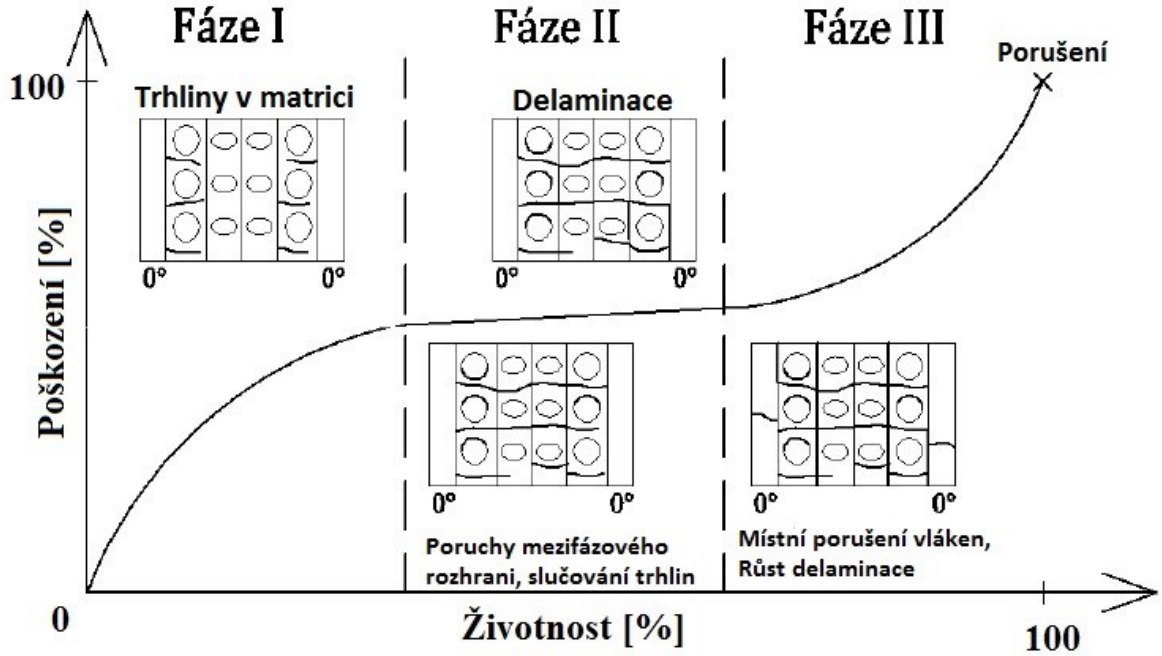
Obr. 17. Průběh poškozování Homogenních a kompozitních materiálů [13]

Typy poškození vyskytující se u vlákny vyztužených kompozitů lze dělit do těchto skupin: [13]

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

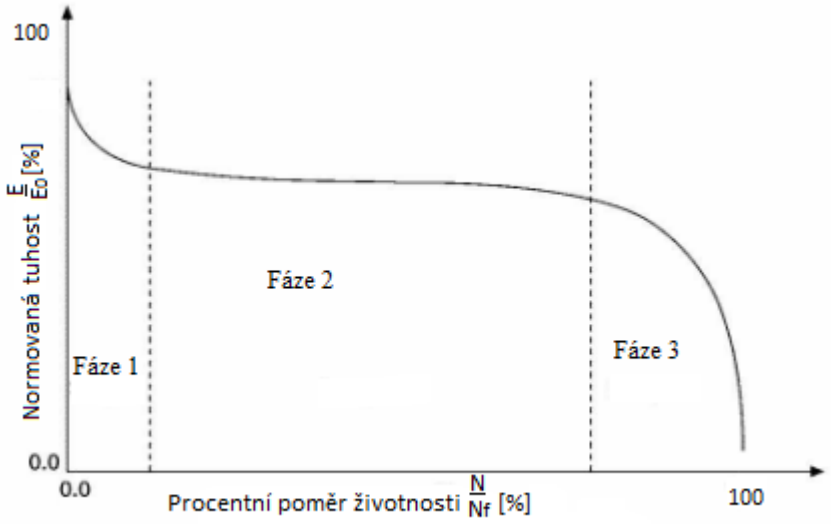
3.1.1 Fáze poškození

Typický proces únavového poškození kompozitního materiálu lze rozdělit do tří fází. První fáze nastává velmi brzy po několika desítkách cyklů a je provázena strmým nárůstem poškození. Hlavním mechanizmem poškození obvykle bývá iniciace trhlinek v matrici. Ve druhé fázi dochází k postupnému nárůstu poškození tak, jak je to znázorněno na Obr. 18. Rostoucí hustota trhlinek v matrici je tak hlavním mechanizmem poškozování. Vyskytuje se zde vláknové přemostění, oddělování matrice od vlákna (tzv. "debonding"), rozptýlené porušení vláken a může být iniciována delaminace. Ve třetí fázi dochází k nestabilnímu růstu delaminace, masivnímu porušování vláken a globálnímu porušení. [15]



Obr. 18. Fáze kumulace typického únavového poškození [14]

Kumulující se poškození kompozitního materiálu se promítá do změny jeho makroskopických vlastností. Obrázek Obr. 19 znázorňuje souvislost mezi mírou poškození a mírou změny normálové tuhosti. Únavové poškození se vyskytuje již po několika desítkách či stovkách cyklů. Převažuje tvorba četných mikrotrhlinek a porušování rozhraní vlákno-matrice. Dochází k rychlému nárustu poškození, který je doprovázen strmým poklesem tuhosti. Ve druhé fázi dochází k pozvolnému poklesu tuhosti. Ve třetí fázi tuhost opět strmě klesá, dochází k praskání vláken a k nestabilnímu šíření delaminace. [15]



Obr. 19. Souvislost poklesu normované tuhosti s kumulací poškození [15]

3.2 Únavová zkouška

Při zjišťování namáhání se pro dynamické zatížení používají dvě metody, jednostupňová a vícestupňová zkouška. Vícestupňová zkouška probíhá tak, že se zkušební těleso zatíží na určitou úroveň deformace nebo napětí, při které nedochází v materiálu ke tvorbě trhlin popřípadě k ostatním změnám. Určité hodnoty značí stav bez poškození. Následuje stupňovité zvyšování úrovně zatížení až do doby, kdy je míra poškození zjistitelná. Protikladem je jednostupňová zkouška (zkouška zvyšování zatížení po určitém počtu cyklů), kde je vyšetřovaná úroveň zatížení, při které se projeví změny vyvolané únavovým zatížením. [13]

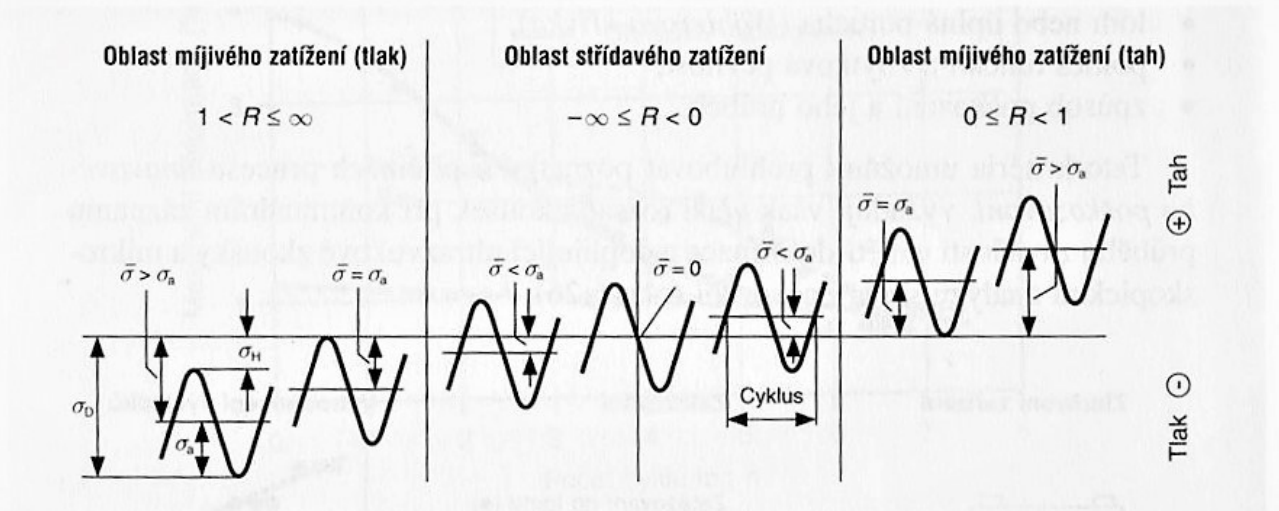
3.2.1 Režim zatížení

Únavová zkouška může probíhat dvěma způsoby a to při konstantním zatížení nebo při konstantním průhybu. I když zkouška probíhá při konstantním zatížení, s rostoucím

počtem cyklů se zvětšuje deformace v důsledku nahromadění poruch v materiálu. Při použití režimu konstantního průhybu dochází k plynulejšímu růstu poruch, protože zatížení pozvolna klesá, nedochází k náhlému poškození zkoušeného vzorku. Během zkoušky nemusí dojít k destruktivnímu porušení vzorku, protože snížením tuhosti dojde k poklesu zatížení. Proto musí být stanoveny i jiné kritéria selhání, díky kterým můžeme zkoušku považovat za ukončenou (např. pokles tuhosti nebo délka trhlin). [13]

3.2.2 Typy zatížení

Kompozitní materiály se chovají jinak při tahovém, tlakovém nebo ohybovém namáhání, 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. Jeho hodnota se mění od minima po maximum. Dynamické zkoušky mohou být provedeny ve třech rozsazích, přičemž může nastat sedm typů zatížení, jak můžete vidět na Obr. 20. Charakteristickým rozměrem úrovně namáhání při cyklickém zatěžování se užívá poměr mezi dolním a horním napětím (R). Únavová pevnost je dána největší amplitudou napětí σ_D, kterou je zkušební těleso schopnu absorbovat po určitý počet cyklů. Když je únavová pevnost překročena, dojde k přelomení vzorku. [13], [16]



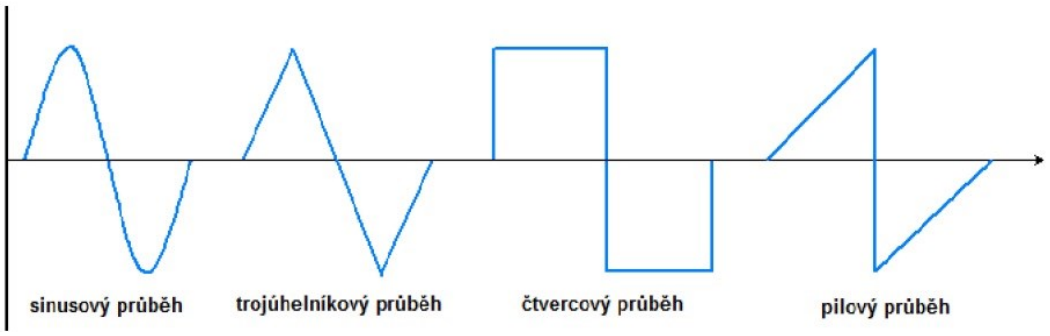
Obr. 20. Oblasti cyklického zatěžování [13]

3.2.3 Zkušební frekvence

Důležitým faktorem při testování kompozitních materiálů je zatěžující frekvence, protože má značný vliv na únavovou životnost materiálu. Frekvence se značí písmenem f a uvádí se v jednotkách Hertz (Hz) nebo počtem cyklů za sekundu. Při použití vyšších frekvencí dochází k ohřevu materiálu. Pro vyloučení ohřevu se volí u vyztužených termoplastů frekvence 1 – 5 Hz a u vyztužených reaktoplastů 5 – 10 Hz. Zkoušky únavy pro různé typy zatížení a různé deformační rychlosti probíhají při konstantní frekvenci. [16], [13]

3.2.4 Průběh zatěžování

Únavovou životnost materiálů také může ovlivňovat tvar průběhu zatěžovací křivky. Nejpoužívanějším je sinusový průběh zatížení, je velmi dobře definovatelný na stroji a také nejvíce odpovídá reálnému zatěžování. Další průběhy mohou mít trojúhelníkový, čtvercový nebo pilový tvar. [16]



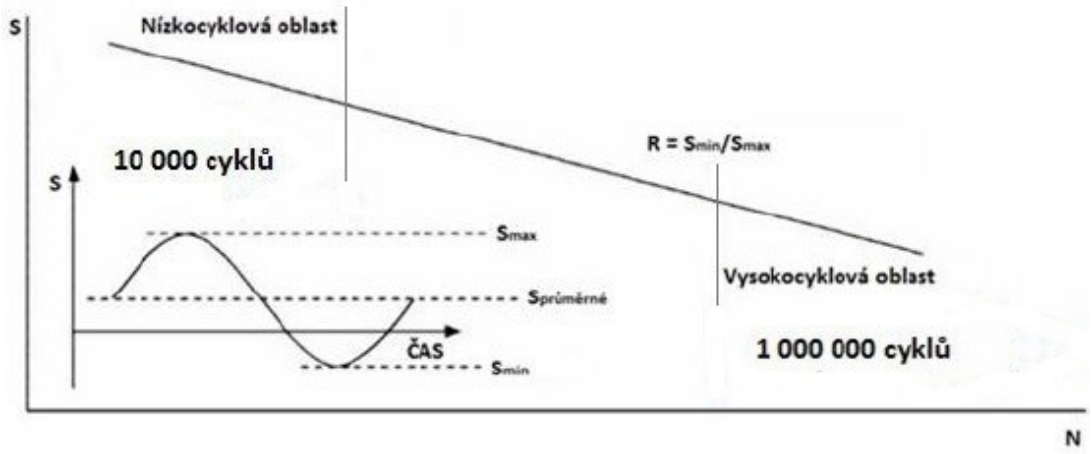
Obr. 21. Průběhy zatěžovací křivky

3.3 Křivky únavového života

3.3.1 S – N křivky

S – N diagram, který je taktéž označován jako Wöhlerova křivka, je pro kompozitní materiály nejčastěji používaný k popisu únavového chování. Parametr S může označovat cyklické zatížení, napětí a deformace. Kdy S je zatížení v procentech z maximální ohybové síly. Obecný termín N obvykle vyjadřuje počet cyklů (v logaritmických souřadnicích) do selhání materiálu. Může být také použit pro indikaci počtu cyklů, při kterých dojde k předem definované změně tuhosti. Křivky S-N jsou obvykle vyneseny pro konstantní hodnotu R, což je poměr mezi minimální a maximální hodnotou S a platí, že tlakové zatížení má zápornou hodnotu. Pro dynamicky zatížené části je lom, jakožto jediné kritérium

únavy nedostatečný, jelikož většina vláknových kompozitů s rostoucí dobou zatížení a postupující únavou vykazuje pokles tuhosti. S-N diagramu je možné osu životnosti rozdělit do tří oblastí: nízkocyklová (vysoké napětí a deformace), vysokocyklová (nízké napětí a deformace) a oblast mezi nimi. Odpovídající počet cyklů závisí na aplikaci materiálu, ale pro struktury, u kterých lze předpovídat vysoký počet cyklů během provozu, lze za nízkocyklovou únavu považovat oblast do 10000 cyklů a vysokocyklovou únavu za oblast začínající přibližně na 1 milionu cyklů. [13]

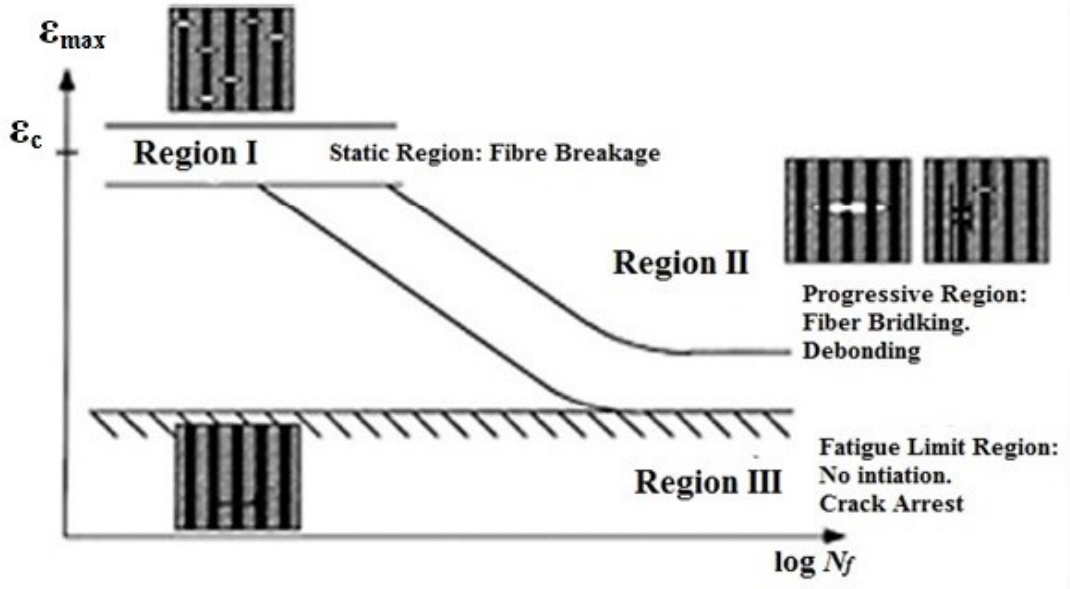


Obr. 22. S-N diagram [15]

3.3.2 **Křivka životnosti ε_A - N_f**

V počátcích zkoumání poškozování kompozitních materiálů při cyklickém zatěžování existoval mylný předpoklad, že proces únavového poškození se stejně jako u kovů skládá z fáze inicializace a šíření defektu. U těchto přístupů nebyl zohledněn zásadní rozdíl mezi polymerní strukturou matrice kompozitu a krystalickou strukturou kovových materiálů ani nebyla zohledněna role jednotlivých složek kompozitu při únavovém poškozování. Jedná se o závislost počtu cyklů do úplného porušení (na vodorovné ose) na maximální deformaci při prvním cyklu při měkkém zatěžování. Diagram je rozdělen na tři oblasti. Oblast I odpovídá pásmu rozptylu statické pevnosti v tahu. Rozhodujícím mechanismem porušení je náhodné a náhlé porušení vláken. Nejedná se o postupné poškozování. Oblast II je oblastí postupného poškozování. Dochází k praskání matrice, trhlinky v matrici se šíří i přes rozhraní vlákno-matrice a dochází k "vláknovému přemostění". Dále může docházet k porušení typu "debonding" nebo ke stabilnímu růstu delaminace. V oblasti III dochází k zastavení šíření mikrotrhlin v matrici na rozhraní vlákno-matrice, často za přítomnosti

místního porušení typu "debonding". U vysokotuhostních kompozitů ale může dojít k dez-interpretaci uvedeného diagramu. Deformace při lomu celého kompozitu je menší než mez únavy matrice. Pás rozptylu statické pevnosti leží pak celý v regionu III, takže může být diagram mylně interpretován tak, že u kompozitů s vysokotuhostním vláknem nedochází k únavovému poškození. [15]



Obr. 23. Diagram únavové životnosti pro jednosměrový kompozit zatěžovaný ve směru vláken [15]

3.4 Normalizované zkušební metody

Mezi zkušebními metodami se nepodařilo najít metodu, která by zcela souvisela s naším zadáním a naším strojem pro únavovou zkoušku, byli nalezeni pouze podobné zkoušky, které jsou zde uvedeny. Pro naše zadání jsme museli vymyslet vlastní zkoušku.

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

Normalizovaná zkušební metoda EN ISO 13003 je jednou z mála dostupných zásad pro únavové zkoušky, které mohou být použity, s ohledem na všechny druhy zkoušek. [16]

ASTM D790 – Jedná se o normalizovanou metodu únavového chování pro ohyb, kompozitních materiálů s polymerní matricí.

II. PRAKTICKÁ ČÁST

4 PŘÍPRAVA K MĚŘENÍ

K měření bylo potřeba vyrobit potřebný počet testovacích vzorků.

4.1 Příprava formy

Důležitou součásti při výrobě desky z kompozitního polymerního materiálu je příprava formy. Pokud by byla příprava formy zanedbána, mohlo by dojít k povrchovým vadám na vzorku a to by se následně mohlo promítnout do výsledku zkoušky. Jako forma pro výrobu vzorků byla použita skleněná deska. Povrch formy byl očištěn a vyleštěn od předchozího používání a následně naseparován separačním voskem Oskar´s M700/C WAS. Separace je potřebná k tomu, aby výsledný výrobek bylo možné lépe odstranit z formy, aniž by způsobil na výsledném produktu nějaké vady.

Obr. 24. Separace povrchu formy

4.2 Příprava kompozitního vlákna

Pro výrobu testovacích vzorků byla vybrána skelná tkanina s označením AEROGLASS s hustotou 200g·m^{-2} od firmy Havel composites CZ. Technický list k této tkanině je uveden v příloze 1. Nůžkami bylo nastříháno osm přibližně stejných čtverců.

Obr. 25. Stříhání skelné tkaniny

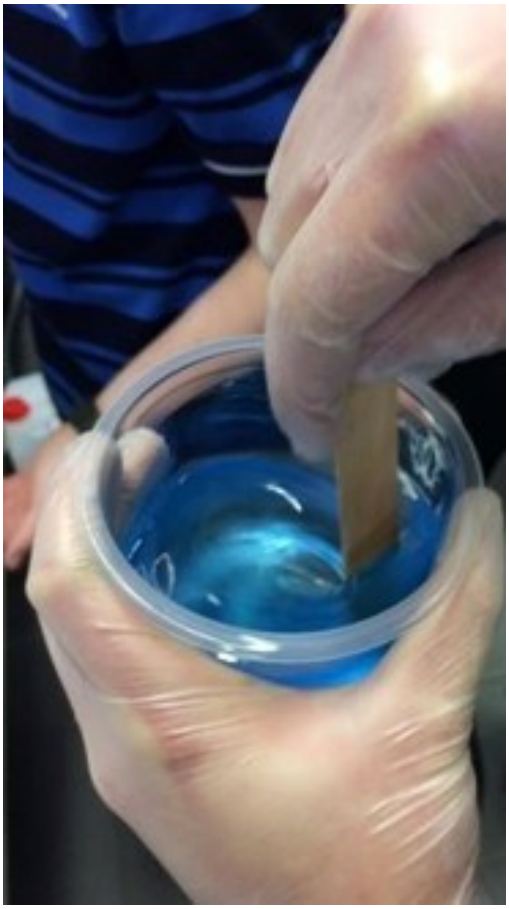
4.3 Příprava matrice

Jako matrice zde byla použita epoxidová pryskyřice HAVEL L285 spolu s tužidlem 285. Tyto dvě složky byly smíchány v poměru 100:40 a důkladně promíchány tak, aby při míchání nevznikaly bublinky. Technický list epoxidové pryskyřice L285 a tužidla 285 je uveden v příloze 2.

Tabulka 1. Specifikace epoxidové pryskyřice L285 a tužidla 285

Specifikace	Epoxidová pryskyřice L285	Tužidlo 285
Hustota g/cm^3 při 25°C	1,18 - 1,23	0,94 – 0,97
Viskozita mPas při 25°C	600 - 900	50 - 100

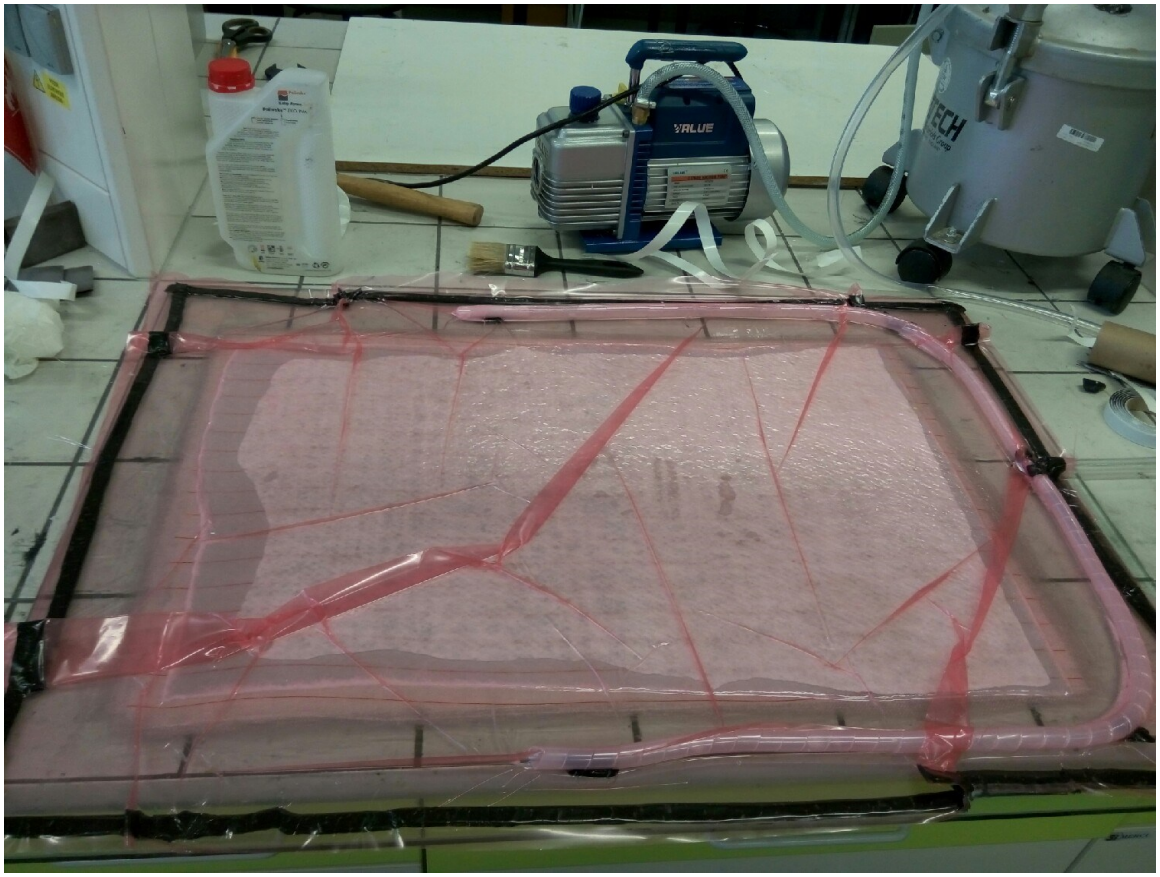
Pro zjištění, jaké množství epoxidové pryskyřice je potřebné pro výrobu desky, je nutné nejdříve zvážit tkaninu, se kterou budeme pracovat. Tato hmotnost byla vynásobena bezpečnostním koeficientem 1,5. Epoxidová pryskyřice a tužidlo bylo smícháno v poměru 100:40 dle doporučení výrobce. Směs se následně musí důkladně promíchat. Pokud směs není dobře promíchána, může dojít k tomu, že na desce budou nevytvrzená místa.



Obr. 26. Míchání epoxidové pryskyřice a tužidla.

4.4 Výroba desky

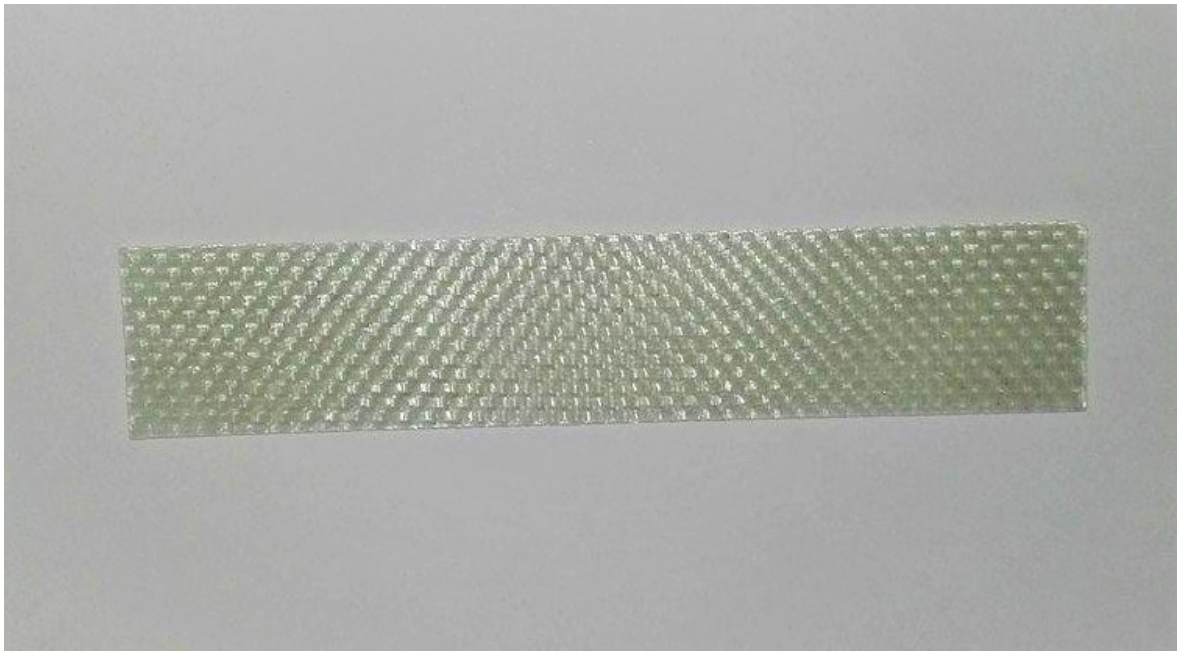
Na připravenou formu byla nanesena tenká vrstva epoxidové směsi, na ni byla přiložena první vrstva tkaniny. Ta byla následně prosycena epoxidovou směsí za pomocí štětce. Kvůli vzniku případných bublin, byla použita plastová stěrka, která byla použita na jejich odstranění. Následně byla přiložena další vrstva tkaniny. Celý proces se poté opakuje až do doby, kdy bylo naneseno potřebných osm vrstev, což odpovídá tloušťce vzorku 1,6 ± 0,1 mm. Na tkaninu s epoxidovou směsí byla nanesena odsávací rohož s odtrhávací tkaninou. Kolem přichystané směsi tkanin byla přidána oboustranná lepící směs jako těsnění. Mezi těsnění a tkaninu bylo přidáno sběrné potrubí pro přebytečnou epoxidovou směs. Všechno bylo přiloženo vakuovací folií, kterou byla pomocí těsnění přilepena k formě. Potrubí bylo přivedeno k vakuovému čerpadlu přes sběrač přebytečné epoxidové směsi.



Obr. 27. Výroba desky

4.5 **Zkušební tělesa**

Pro nařezání zkušebních vzorků na zkušební tělesa byla použita okružní pila s diamantovým kotoučem. Nejdříve byla deska zbavena nerovných okrajů a trčících vláken, následně byly na desku narýsovány a nařezány jednotlivé vzorky o potřebné velikosti – 100 x 20 mm.



Obr. 28. Zkušební vzorek

5 STATICKÁ ZKOUŠKA OHYBEM

Pro zjištění s jakými vlastnostmi byl materiál vyroben, je zapotřebí provést statickou zkoušku jednoosým tříbodovým ohybem. Díky této zkoušce byly zjištěny materiálové charakteristiky, jako je modul pružnosti, mez pevnosti, maximální ohybová síla a maximální průhyb vzorku. Měření proběhlo na zkušebním stroji ZWICK 1456. Tento stroj je určen pro statické i nízkocyklové dynamické zkoušky v tahu, tlaku, ohybu a smyku. Vyhodnocení výsledků probíhalo na počítači připojeném ke zkušebnímu stroji pomocí softwaru TestXpert. Součástí zkušebního stroje je také teplotní komora, která umožňuje testování při zvýšené popřípadě snížené teplotě.

Obr. 29. Zkušební stroj ZWICK 1456

Podpěry pod vzorky byly ve vzdálenosti 80 mm a radius podpěr i zatěžovacího trnu měl velikost 5 mm.

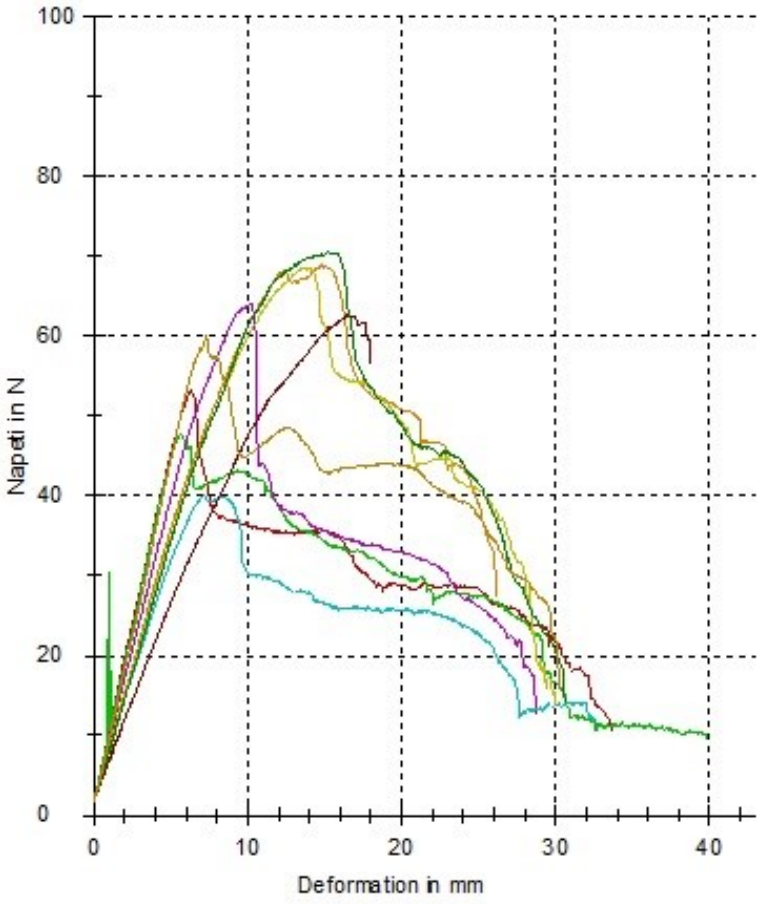
Obr. 30. Průběh statické zkoušky ohybem

5.1 Naměřená data

V tabulce 2. je vyhodnocení statické zkoušky. Jednotlivé veličiny jsou modul pružnosti v ohybu E, mez pevnosti v ohybu σ_{fm}, maximální ohybová síla potřebná pro zlomení zkušebního tělesa F_{OMax} a maximální výchylka zkušebního vzorku před zlomením y.

Tabulka 2. Základní charakteristika statické zkoušky

n = 9	E [MPa]	σ_{fm} [MPa]	F_{OMax} [N]	y [mm]
1.	11900	112	53,3	6,3
2.	9860	89,7	47,69	5,6
3.	10900	163	68,98	14,8
4.	10300	135	64,19	10,2
5.	10300	95,3	40,07	7,1
6.	10400	162	68,57	13,7
7.	8000	149	62,64	16,4
8.	10100	168	70,46	15,2
9.	11100	126	59,92	7,3
Průměrná hodnota	10300	133	59,54	10,7
Směrodatná odchylka	1070	29,6	10,49	4,3
Variační koeficient [%]	10,38	22,18	17,62	40,13



Obr. 31. Závislost maximální ohybové síly na maximální výchylce

Z důvodu velké odchylky bylo rozhodnuto k zpřesnění výsledků zanedbat tři nejhorší naměřené hodnoty zatěžující síly. Tak z původně 9 testovaných vzorků zbylo pouze 6. Výsledky po zanedbání jsou uvedeny v tabulce 3.

Tabulka 3. Upravená statická zkouška

n = 6	E [MPa]	σ_{fm} [MPa]	F_{OMax} [N]	y [mm]
1.	10900	163	68,98	14,8
2.	10300	135	64,19	10,2
3.	10400	162	68,57	13,7
4.	8000	149	62,64	16,4
5.	10100	168	70,46	15,2
6.	11100	126	59,92	7,3
Průměrná hodnota	10133,33	151,5	65,79	12,93
Směrodatná odchylka	1111,16	17,96	4,16	3,48
Variační koeficient [%]	10,97	11,83	6,32	26,91

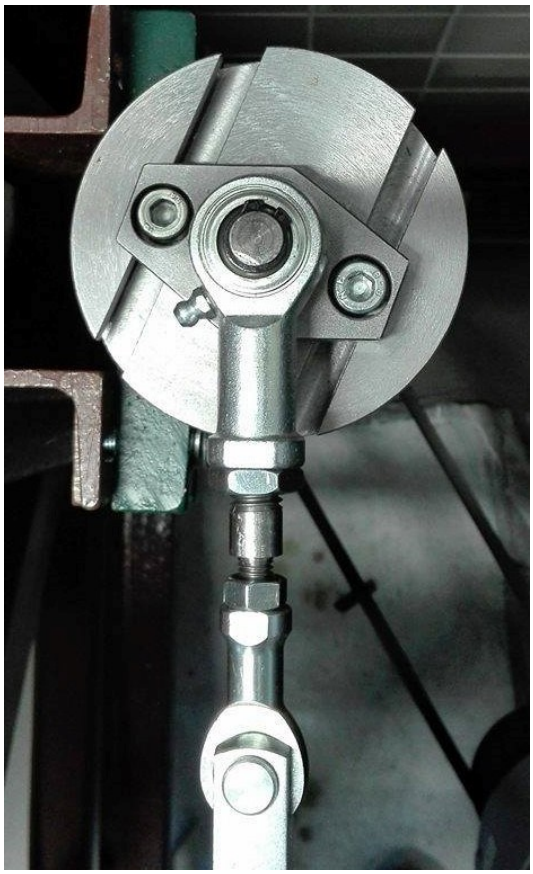
6 DYNAMICKÁ ZKOUŠKA

6.1 Popis zkušebního stroje pro únavové zkoušky

Dynamická zkouška byla prováděna za pomocí zkušebního stroje pro únavové zkoušky materiálu. Tyto zkoušky byly prováděny na speciálním jednoúčelovém zkušebním stroji vyrobeném na ústavu výrobního inženýrství. Tento zkušební stroj byl poprvé použit k mé bakalářské práci, takže bylo za potřebí se s přístrojem naučit pracovat. Zkušební stroj se skládá z elektromotoru, převodovky, řemenic, vřetene s přírubou, vodící tyče, podpěry s úchyty a počítače.

Obr. 32. Zkušební stroj pro únavové zkoušky

Elektromotor SIEMENS 1LA7090-4 o výkonu 1,1 kW vyvine maximální otáčky 2000 ot·min^{-1}. Převodovka TOS Znojmo typ MTC32621 s převodovým poměrem 7,1:1. Řemenice zachovávají převodový poměr konstantní a to 1:1. Na konci vřetene je umístěna příruba, která je určená k nastavení amplitudy výchylky měřeného vzorku. Vodící tyč s nastavitelnou délkou slouží k nastavení výchylky uložení vzorku. Nastavování amplitudy výchylky a délky vodící tyče je uvedeno na Obr. 33. Vzorek byl upevněn v podpěrách s úchyty. Podpěry jsou od sebe vzdáleny ve stejné vzdálenosti jako u statické zkoušky a to 80 mm. Schéma uložení vzorků je uvedeno na Obr. 34. Ke zkušebnímu stoji je připojen počítač, který přes program Easy-Drive zobrazuje čas měření a účinnost elektromotoru.



Obr. 33. Nastavení amplitudy výchylky a délky vodící tyče

Obr. 34. Schéma uložení vzorku v podpěrách s úchyty

6.2 Parametry cyklické zkoušky

Nejdříve byla podle maximálních otáček motoru přepočítána frekvence amplitudy.

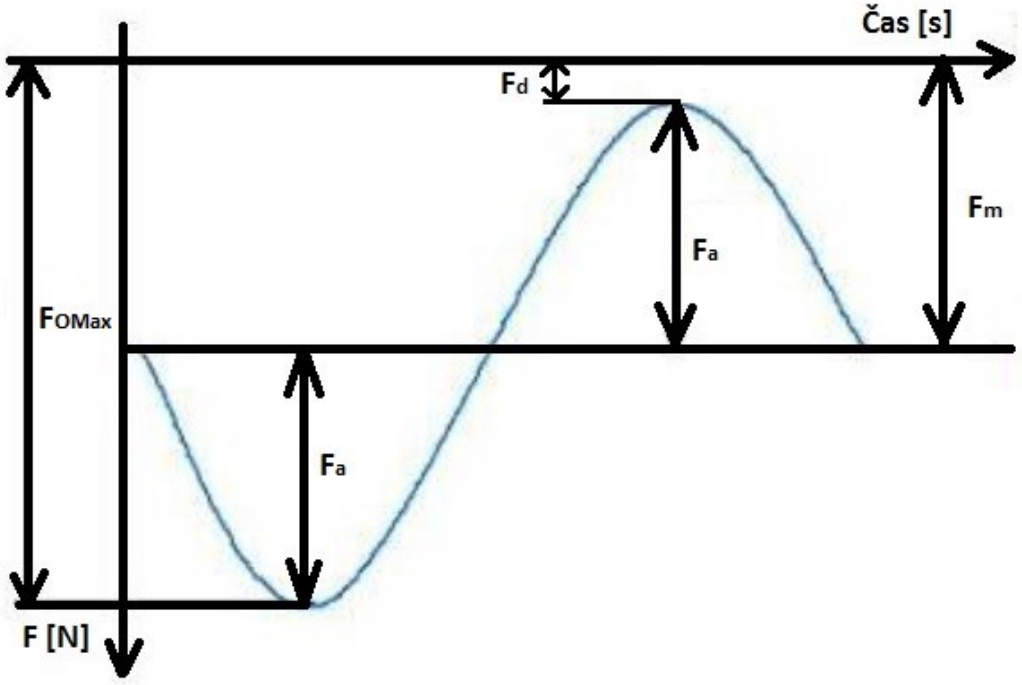
$$f = \frac{n}{60 \cdot i} = \frac{2000}{60 \cdot 7{,}1} = 4{,}7\ Hz \doteq 5\ Hz \tag{12}$$

Následně bylo z průměrné hodnoty maximální ohybové síly a maximální výchylky přepočítáno zatížení pro při 90 %, 70 % a 50 %. Přepočítané hodnoty jsou uvedeny v tabulce 4.

Tabulka 4. Hodnoty zatížení

Zatížení	100 %	90 %	70 %	50 %
F_{OMax} [N]	66	60	46	33
y [mm]	13	11,7	9,1	6,5

Pro jednotlivá zatížení musely být spočítány jednotlivé členy sinusového zatížení (Obr. 35) a následně přepočítány na milimetry, aby mohl být nastaven zkušební stroj.



Obr. 35. Sinusový průběh zatížení

Způsob výpočtu pro 90 % zatížení.

$$\frac{F_d}{F_{OMax}} = 0{,}2 \tag{13}$$

$$\frac{F_d}{60} = 0{,}2$$

$$F_d = 12\ N$$

$$F_{OMax} = 2 \cdot F_a + F_d \tag{14}$$

$$60 = 2 \cdot F_a + 12$$

$$F_a = 24\ N$$

$$F_m = F_{OMax} - F_a \tag{15}$$

$$F_m = 60 - 24$$

$$F_m = 36\ N$$

Pomocí trojčlenky byla dopočítána závislost síly na průhybu, jak je uvedeno v tabulce 5. Stejným způsobem bylo přepočítáno 70 % a 50 % zatížení. V tabulce 6 je uveden výpočet pro 70 % zatížení a v tabulce 7 pro 50 % zatížení.

Tabulka 5. Shrnutí výpočtu pro 90 % zatížení.

	F_{OMax}	F_d	F_a	F_m
F [N]	60	12	24	36
y [mm]	11,7	2,3	4,7	7

Tabulka 6. Výpočet pro 70 % zatížení.

	F_{OMax}	F_d	F_a	F_m
F [N]	46	9,2	18,4	27,6
y [mm]	9,1	1,8	3,6	5,5

Tabulka 7. Výpočet pro 50 % zatížení.

	F_{OMax}	F_d	F_a	F_m
F [N]	33	6,6	13,2	19,8
y [mm]	6,5	1,3	2,6	3,9

6.3 Únavová zkouška

Podle hodnot uvedených v tabulce 5 a Obr. 35 bylo nastaveno 90 % zatížení vzorku. Na přírubě sloužící k nastavení amplitudy byla nastavena velikost amplitudy $2 \cdot F_a$ což je 9,2 mm. Následně byla vyrovnána vodící tyč s uložením vzorku pomocí úchylkoměru a horního úchytu z nepoužité podpěry, který byl přišroubován na konec vodící tyče (jak je uvedeno na Obr. 36). Byla přesunuta dolní úvrať amplitudy do jejího minima, která je 2,3 mm. Tím byla zkouška 90 % zatížení nastavena. Stejným způsobem bylo postupováno i při nastavení 70 % a 50 % zatížení

Obr. 36. Nastavení délky vodící tyče

Zapnu elektromotor, ale zatím pouze na nízké otáčky z důvodu kontroly. Během několika málo prvních otáček zjistím, zda je zkoušený vzorek v pořádku, pokud při tomto zatížení vzorek praskne tak tomu tak není. Pokud vzorek nepraskne, přidávám otáčky až na maximum 2000 $ot \cdot min^{-1}$ a začnu měřit čas. Pomocí naměřeného času, jak dlouho zkušební vzorek vydrží, určíme počet cyklů, které vykonal. Vím, že máme frekvenci amplitudy 5 Hz což je 5 vykonaných cyklů za sekundu. Jednoduchým převedením zjistím, že zkušební stroj vykoná 18 000 cyklů za hodinu.

Vzorec pro předení vykonaných cyklů

$$o = f \cdot 3600 \tag{16}$$

$$o = 5 \cdot 3600$$

$$o = 18\,000\ ot \cdot hod^{-1}$$

7 VÝSLEDKY ZKOUŠEK

Pro studium únavového chování byl stanoven počet cyklů, při kterém došlo k porušení zkušebního vzorku v průběhu cyklické zkoušky a následná křivka únavy.

7.1 Zkouška při 90 % zatížení

Při tomto zatížení se dalo předpokládat, že vzorek nevydrží dlouhou dobu pod zatížením. Bohužel tomu tak bylo a všechny zkoušené vzorky vydržely pouze několik málo prvních cyklů a poté prasky. Po pěti takto naměřených vzorcích bylo rozhodnuto ve zkoušce pod tímto zatížení dále nepokračovat a přejít k měření pod menším zatížením. Shrnutí měření se je uvedeno v tabulce 8.

Tabulka 8. Měření při 90 % zatížení

Zkušební těleso číslo	Doba měření	Počet cyklů při 90 % zatížení
1.1	0:00:04	20
1.2	0:00:02	10
1.3	0:00:03	15
1.4	0:00:06	30
1.5	0:00:05	25
Průměrná hodnota	0:00:04	20
Směrodatná odchylka	0:00:02	7,91
Variační koeficient [%]	50	39,55

7.2 Zkouška při 70 % zatížení

Toto měření probíhalo bez jakýchkoliv problému a úspěšně se nám podařilo změřit všechny vzorky, i když byly mezi těmito měřeními rozdíly. Shrnutí tohoto měření je uvedeno v tabulce 9.

Tabulka 9. Měření při 70 % zatížení

Zkušební těleso číslo	Doba měření	Počet cyklů při 70 % zatížení
2.1.	4:30:06	81 030
2.2.	2:26:34	43 970
2.3.	3:18:19	59 495
2.4.	3:49:11	68 755
2.5.	4:02:51	72 855
2.6.	3:37:40	65 300
Průměrná hodnota	3:37:27	65 234
Směrodatná odchylka	0:42:18	14 187
Variační koeficient [%]	19,45	21,75

7.3 **Zkouška při 50 % zatížení**

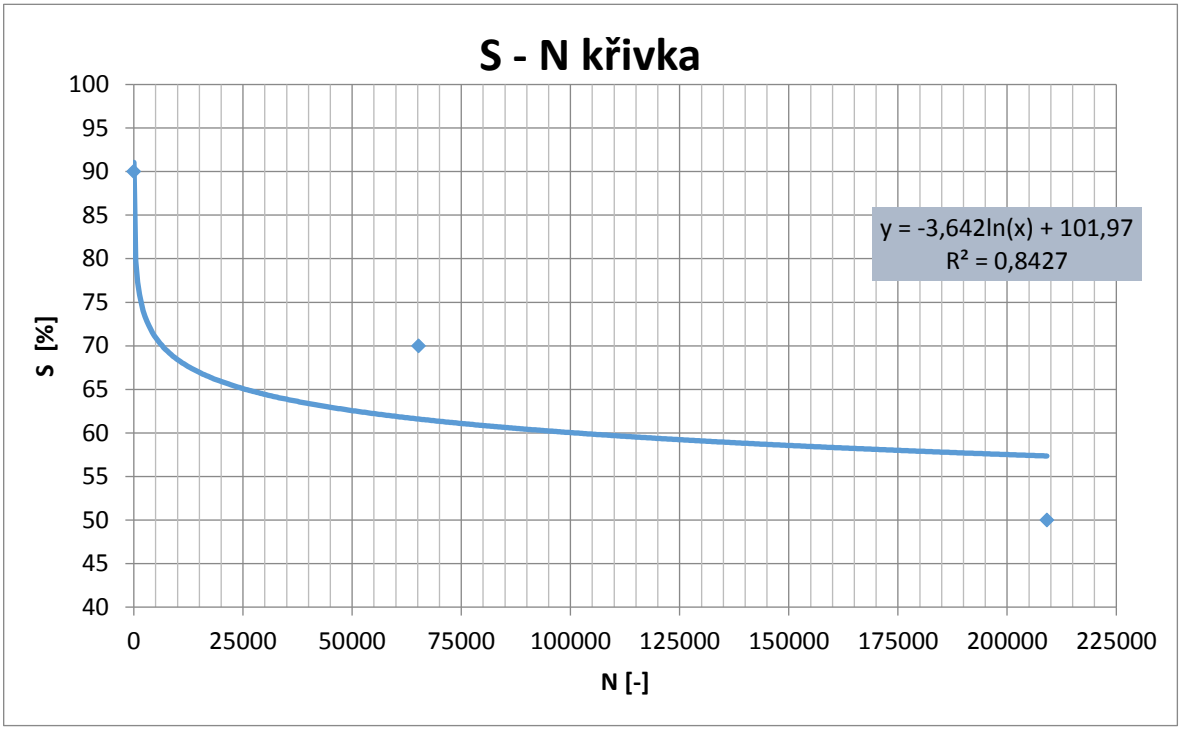
Během tohoto zatížení nastala zajímavá situace, i po více jak 11 hodinách měření vzorek nepraskl. Z důvodu trvanlivosti zkušebního stroje bylo měření ukončeno a další zkoušku při tomto zatížení již nebylo prováděno. Shrnutí tohoto měření je uvedeno v tabulce 10.

Tabulka 10. Měření při 50 % zatížení

Zkušební těleso číslo	Doba měření	Počet cyklů při 50 % zatížení
3.1.	11:37:00	209 100

7.4 S - N křivka

Z naměřených hodnot byla vytvořena křivka životnosti pro zkušební vzorky. Pro přesnější sestrojení této křivky by bylo nutné provést více zkoušek, samozřejmě i pro jiné úrovně zatížení. To by ovšem vyžadovalo vysoké počty cyklů a také velkou časovou náročnost, z těchto důvodů nebyla možnost tyto zkoušky provést.



Obr. 37. S - N křivka

ZÁVĚR

Cílem této bakalářské práce bylo zjistit, jaké vydrží pružiny vyrobené z kompozitního materiálu únavové namáhání. Pro zkušební tělesa jsme si vybrali skelnou tkaninu a vyráběny byly ručním kladením jednotlivých vrstev s epoxidovou pryskyřicí a následným vakuovým dolisováním. Únavové zkoušky byly provedeny pro tři úrovně zatížení.

Nejdříve byla provedena statická zkouška tříbodovým ohybem pro stanovení základních materiálových vlastností cyklicky nezatížených těles. Z maximální ohybové síly byly stanoveny úrovně zatížení, při kterých únavové zkoušky probíhaly. Tyto úrovně byly stanoveny na 90 %, 70 % a 50 % z maximální ohybové síly jednotlivých zkušebních těles.

Únavová zkouška začala na 90 % zatížení maximální ohybové síly. Při tomto měření se změřilo pět vzorků a všechny vyšly přibližně stejně a o tak, že se přelomily během prvních několika málo cyklů. Průměrná hodnota tohoto měření bylo přibližně 20 cyklů. To mohlo být způsobeno špatným prosycením vzorků pryskyřicí. Následující zkouška pro 70 % zatížení maximální ohybové síly proběhlo bez jakýchkoliv problémů a průměrně vydrželi vzorky 65 234 cyklů. Nejméně vydržel vzorek číslo 2 a to pouze 43 970 cyklů. Nejvíce vydržel vzorek číslo 1 a to 81 030 cyklů. Velký rozdíl mezi těmito hodnotami byl s největší pravděpodobností také způsoben špatným prosycením. Zkouška pro 50 % zatížení maximální ohybové síly byla ukončena ještě před tím než vzorek praskl a to přibližně po 209 100 cyklech. Zkouška byla předčasně ukončena z důvodu velké časové náročnosti, vzorek byl v dobrém stavu a s největší pravděpodobností by dalších 200 000 cyklů vydržel, proto byla zkouška provedena pouze pro jeden vzorek. To předpokládá i S - N křivka. Po této zkoušce bylo měření ukončeno.

Z měření vyplívá, že ruční kladení a prosycení výrobku není pro pružiny a tento druh namáhání příliš vhodný. Kdybych pro výrobu testovacích vzorků použil na místo skelné tkaniny skelný prepreg dosáhl bych lepšího prosycení vzorků a tím i lepších vlastností při tomto druhu namáhání.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

[1] VLK, František. *Podvozky motorových vozidel*. 3., přeprac., rozš. a aktualiz. vyd. Brno: František Vlk, 2006. ISBN 80-239-6464-X.

[2] *President* [online]. [cit. 2017-03-31]. Dostupné z: http://auta5p.eu/clanky/nw/president.php

[3] *Ford model T* [online]. [cit. 2017-03-31]. Dostupné z:

https://cs.wikipedia.org/wiki/Ford_model_T

[4] *Zadní příčné listové pero* [online]. [cit. 2017-03-31]. Dostupné z:

http://www.henkel-adhesives.cz/automotive/novinky-11253_lehke-jako-pirko-12125_CZC_HTML.htm

[5] HAPPIAN-SMITH, Julian. *An introduction to modern vehicle design*. Portland: Ringgold Inc, 2004. Copyright - Copyright Book News, Inc. Mar 2004, 585 s. ISBN 07506 5044 3

[6] Výroba. *HŽP a.s*. [online]. [cit. 2017-03-31]. Dostupné z:

http://hzap.cz/pages/cze/vyrabime.php

[7] *Listová pružina* [online]. [cit. 2017-03-31]. Dostupné z:

http://www.listovapera.eu/index.php?id=p-38

[8] 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.

[9] Military handbook - MIL-HDBK-17-1F: Composite materials handbook, Volume 1 - Polymer matrix composites guidelines for characterization of structural materials, U.S. Department of defense, 2002. 586 s. electronic ISBN 978-1-59124-509-4.

[10] JANČÁŘ, Josef. *Úvod do materiálového inženýrství polymerních kompozitů*. Vyd. 1. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2003, 194 s. ISBN 80-214-2443-5.

[11] *Kordcarbon: Uhlíkové vlákno*. Kordcarbon.cz [online]. [cit. 2017-04-18].

Dostupné z: http://www.kordcarbon.cz/uhlikove_vlakno

[12] VNOUČEK, Milan. *Kompozitní materiály* [online]. [cit. 2017-04-18]. Prezentace. Západočeská univerzita v Plzni. Dostupné z: http://www.ateam.zcu.cz/download/kompozity09_10.pdf

[13] EHRENSTEIN, Gottfried W. *Polymerní kompozitní materiály*. V ČR 1. vyd. Praha: Scientia, 2009, 351 s. ISBN 978-80-86960-29-6.

[14] KRÁL, Michal. *Únava vlákny vyztužených kompozitů s polymerní matricí* [online]. Praha, 2014 Prezentace. Výzkumný a zkušební letecký ústav, a.s. Útvar kompozitní technologie. Dostupné z: http://www.csm-kompozity.wz.cz/Prezentace_UTAM.pdf

[15] MĚŠŤÁNEK, Petr. *Únavové poškozování kompozitních materiálů.* [cit. 2017-04-18]. Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta aplikovaných věd, 2014. Vedoucí diplomové práce Prof. Ing. Vladislav Laš, CSc.

[16] VASSILOPOULOS, Anastasios P. *Fatigue life prediction of composites and com-posite structures: edited by Anastasios P. Vassilopoulos*. Oxford: Woodhead Pub-lishing, 2010. Woodhead Publishing in materials. ISBN 1439827893.

[17] *Laminační pryskyřice L285.* havel-composites.com [online]. [cit.20.04.2017]. Dostupné z: http://www.havel-composites.com/proddocs/TL%20L%20285%20MGS%20a%20tuz%20CZ.pdf

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

a_p		Charakteristika hlavní pružiny
ASTM		Americká technická norma
b	[m]	Šířka listu
b_p		Charakteristika přídavné pružiny
c	[-]	Pružinová konstanta
c_p		Výsledná charakteristika
d	[m]	Průměr vlákna
E	[Pa]	Modul pružnosti v tahu
EN		Evropská technická norma
f	[Hz]	Frekvence amplitudy
F_a	[N]	Polovina amplitudy
F_d	[N]	Dolní úvrať ampitudy
F_m	[N]	Vzdálenost mezi nulovou výchylkou amplitudy a nulou
F_{max}	[N]	Maximální pružící síla
F_0	[N]	Síla působící na pružinu
F_{OMax}	[N]	Maximální ohybová síla
G	[Pa]	Modul pružnosti ve smyku
g_1, g_2	[m]	Poměr vzdálenosti zatížení a celkové délky pružiny
h_0	[m]	Tloušťka listu pružiny
h_x	[m]	Tloušťka listu v libovolné vzdálenosti
i	[-]	Převodový poměr
ISO		Česká technická norma
J_p	[kg·m^2]	Polární moment setrvačnosti
K	[-]	Tvarový součinitel
l	[m]	Délka vlákna

l_0	[m]	Šířka vetknutí
m	[kg]	Hmotnost
MIL		United States Military
n	[-]	Počet kusů
N	[-]	Počet cyklů
NASA		National Aeronautics and Space Administration
n_l	[-]	Počet listů
n_z	[-]	počet činných závitů
NW		Nesselsdorfer Wagenbau-Fabriks-Gesselschaft
o	[ot·hod^{-1}]	Počet vykonaných cyklů
R	[-]	Poměr horního a dolního napětí
S	[%]	Cyklické zatížení
x_1, x_2	[m]	Libovolná vzdálenost na pružině
y	[m]	Maximální výchylka vzorku
z_0	[m]	Zdvih pružiny
σ_{dov}	[Pa]	Dovolené napětí v ohybu
σ_{fm}	[Pa]	Mez pevnosti v ohybu
ω	[kg^{-1}]	Netlumená vlastní frekvence

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1. Pružinové konstanty pro různé druhy ocelových pružin [1]……..…….11

Obr. 2. NW Präsident 1897 [2]……..…….……12

Obr. 3. Ford T 1908 [3]……13

Obr. 4. Zadní příčné listové pero Volvo XC90 [4]……...……...13

Obr. 5. Listová pružina [6]……...……14

Obr. 6. Listová pružina v zatížení, (a) zatížení kola, (b) působící síly [5]……..……15

Obr. 7. Možnosti upevnění plastických vložek [1]……...……...15

Obr. 8. Jednolistová pružina s parametry [1]……...……16

Obr. 9. Parabolická pružina [6]……...…….17

Obr. 10. Schéma a konstrukční provedení listové pružiny s přídavnou pružinou [1]…...18

Obr. 11. Deformační charakteristika listové pružiny s přídavnou listovou pružinou [1]...18

Obr. 12. Listová pružina s přídavným listem [7]……...….19

Obr. 13. Deformační charakteristika listové pružiny s přídavným listem [1]…….…..…..19

Obr. 14. Rozdělení konstrukčních materiálů……...…….....21

Obr. 15. Rozdělení kompozitních materiálů podle geometrického tvaru výztuže a) částicový b) s krátkými vlákny c) s dlouhými vlákny s tkaninou v jednom směru d) s dlouhými vlákny s tkaninou ve více směrech [8]…….……...…22

Obr. 16. Uložení tkanin: a) Plátno b) Kepr 2/2 c) Atlas [10]…….……...…24

Obr. 17. Průběh poškozování Homogenních a kompozitních materiálů [13]….……...…28

Obr. 18. Fáze kumulace typického únavového poškození [14]…….……..……29

Obr. 19. Souvislost poklesu normované tuhosti s kumulací poškození [15]……...…30

Obr. 20. Oblasti cyklického zatěžování [13]……...…….…31

Obr. 21. Průběhy zatěžovací křivky……...……..32

Obr. 22. S-N diagram [15]……...……33

Obr. 23. Diagram únavové životnosti pro jednosměrový kompozit zatěžovaný ve směru vláken [15]……...……...34

Obr. 24. Separace povrchu formy……...…….36

Obr. 25. Stříhání skelné tkaniny……...……37

Obr. 26. Míchání epoxidové pryskyřice a tužidla……...…….38

Obr. 27. Výroba desky……...……..39

Obr. 28. Zkušební vzorek……...……..40

Obr. 29. Zkušební stroj ZWICK 1456……..41

Obr. 30. Průběh statické zkoušky ohybem……...……42

Obr. 31. Závislost maximální ohybové síly na maximální výchylce……...……43

Obr. 32. Cyklický stroj……...……..44

Obr. 33. Nastavení amplitudy výchylky a délky vodící tyče……...……45

Obr. 34. Schéma uložení vzorku v podpěrách s úchyty……...……45

Obr. 35. Sinusový průběh zatížení……...……46

Obr. 36. Nastavení délky vodící tyče……...……48

Obr. 37. S - N křivka…….……...51

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1. Specifikace epoxidové pryskyřice L285 a tužidla 285……...…38

Tabulka 2. Základní charakteristika statické zkoušky…….……42

Tabulka 3. Upravená statická zkouška……..……...43

Tabulka 4. Hodnoty zatížení……...…….46

Tabulka 5. Shrnutí výpočtu pro 90 % zatížení……..….…….47

Tabulka 6. Výpočet pro 70 % zatížení……..……..47

Tabulka 7. Výpočet pro 50 % zatížení……..……..47

Tabulka 8. Měření při 90 % zatížení……49

Tabulka 9. Měření při 70 % zatížení……50

Tabulka 10. Měření při 50 % zatížení……..50

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha I: Technický list skelné tkaniny

Příloha II: Technický list epoxidové pryskyřice a tužidla

PŘÍLOHA I: TECHNICKÝ LIST SKELNÉ TKANINY

Karta techniczna

Tkanina szklana 200 g/m2
AEROGLASS
Splot płócienny

Waga na jednostkę powierzchni		200 g/m2 +/- 15 g
Splot		płócienny
Brzegi		obcięte
Gęstość cm	osnowa	8 +/- 0,7
Gęstość cm	wątek	7+/- 0,6
Użyta preparacja		Bezpośrednia silanowa
Wytrzymałość na rozciąganie N/50*200 mm	osnowa	≥ 1300
	wątek	≥ 1100
Szerokość cm		100 +/- 1cm
Długość tkaniny / 1rolce m		100 m +/- 1 cm
Zalecane warunki przechowywania	temperatura	Do 15,5° C
	wilgotność	Do 48 %
Pakowanie	Tuba papierowa	Średnica wewnętrzna 76 mm
Opakowanie		Folia polietylenowa

Havel Composites CZ , s.r.o.,Svésedlice 67,Přáslavice,783 54
Tel.: 585 129 010,Fax 585 129 040,
www.havel-composites.cz, info@havel-compositec.cz

PŘÍLOHA II: TECHNICKÝ LIST EPOXIDOVÉ PRYSKYŘICE A TUŽIDLA

1

L A M I N A Č N Í P R Y S K Y Ř I C E L 285
T U Ž I D L A 285, 286, 287

Návod k použití, technické listy

Charakteristika

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

Použití

Systém laminační pryskyřice, schválený německým federálním úřadem pro letectví, má rozdílné doby zpracovatelnosti (v závislosti na použitém tužidle) pro výrobu s použitím skelných, uhlíkových a kevlarových vláken a vyznačuje se vysokými statickými a dynamickými vlastnostmi.

Po tepelném vytvrzení při 50 - 55 °C systém splňuje standard pro větroně a motorové větroně (pracovní teplota - 60 °C až + 54 °C. Pro splnění požadavků motorových letadel (pracovní teploty - 60 °C až + 72 °C) je nezbytné tepelné vytvrzení při 80 °C.

Rozmezí doby zpracovatelnosti (tzv. pot life) je mezi přibližně 45 min. a 5 h v závislosti na druhu tužidla. Tužidla mají stejný poměr míchání a mohou být míchány mezi sebou v jakémkoli poměru. Toto dovoluje výběr optimálního systému pro všechny metody zpracování. Po počátečním vytvrzení při pokojové teplotě jsou vyrobené komponenty opracovatelné a lze je vytáhnout z formy. Získáte vysoce se lesknoucí a nelepivé povrchy, a to dokonce i při nepříznivých podmínkách při vytvrzování, tj. nižší teploty nebo vysoká vlhkost.

Viskozita směsi zaručuje rychlé a dokonalé prosycení vláken, nicméně, pryskyřice se nerozlije na tkanině na vertikálním povrchu. Za účelem získání zvláštních vlastností je rovněž možné přidat ke směsi pryskyřice/tužidlo nejrůznější plniva, např. aerosil, mikrobalony, bavlněné vločky, kovový prášek apod.
Pokud se nevyžaduje vysoká tepelná odolnost či letecké schválení, dá se tužidlo 285 použít bez následného temperování. Nicméně, uvedené vlastnosti získá pouze po tepelném vytvrzení při teplotách nad 50 °C.

Použití
Laminační systém má hydrofilní charakter (vyšší absorpce vlhkosti, nižší odpor rozptylu páry). Proto neočekáváme žádné problémy kompatibility při jeho kombinaci s polyesterovými gelcoaty, rozmanitými barvami (např. na bázi PUR) atd. Bohužel však nemáme k dispozici testy těchto kombinací.

Od svého schválení v roce 1985 byl laminační systém L 285 používán téměř všemi výrobci letadel a kluzáků a - zvláště kvůli své extrémně dobré fyziologické kompatibilitě - je nejvíce užívaným systémem dnešního leteckého průmyslu. Často se stává, že pracovníci, kteří zaznamenali problémy s některými epoxidy (alergie či podráždění pokožky), jsou schopni zpracovávat laminační pryskyřici L 285.

Je nutno dodržovat příslušná bezpečností pokyny pro manipulaci s epoxidovými pryskyřicemi a tužidlo a naše instrukce pro bezpečné zpracování.

Specifikace

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

		Tužidlo 285	Tužidlo 286	Tužidlo 287
Hustota °C	g/cm3 / 25	0,94 - 0,97	0,94 - 0,97	0,93 - 0,96
Viskozita °C	mPas / 25	50 - 100	60 - 100	80 - 100
Aminové číslo G	mg KOH /	480 - 550	450 - 500	450 - 500
Barva Gardner		max 3 (*)	max 3 (*)	max 3 (*)

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

Podrobnosti pro zpracování

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

Technické informace o zesílené pryskyřici

Statické testy

Vytvrzení: 24 h při 23 °C + 15 h při 80 °C		G R C Skelné vlákno G F K	C R C Uhlík. vlákno C F K	S R C Kevlar.vlákno S F K
Pevnost v ohybu	psi x 10^3	74 - 81	104 - 112	51 - 55
	N/mm2	510 - 560	720 - 770	350 - 380
Pevnost v tahu	psi x 10^3	67-73	74 - 80	58 - 70
	N/nm2	460 - 500	510 - 550	400 - 480
Pevnost v tlaku	psi x 10^3	59 - 64	67 - 74	20 - 23
	N/nm2	410 - 440	460 - 510	140 - 160
Pevnost ve střihu	psi x 10^3	6,1 - 6,7	6,8 - 8,0	4,2 - 4,9
	N/nm2	42 - 46	47 - 55	29 - 34
Modulus pružnosti	psi x 10^3	2,9 - 3,5	5,8 - 6,5	2,3 - 2,8
	N/nm2	20 - 24	40 - 45	16 - 19

GRC vzorky: 16 vrstev skelné tkaniny, 8 H satén, 296 g/m2, 4 mm silné
CRC vzorky: 8 vrstev uhlíkové tkaniny, plátno, 200 g/m2, 2 mm silné
SRC vzorky: 15 vrstev kevlarové tkaniny, 4H satén, 170 g/m2, 4 mm silné

Obsah vláken ve vzorcích během výroby/testování: 40 - 45 vol%
Data propočítaná na obsah vláken 43 vol%

Typická data dle WL 5.3203 Části 1 a 2 Manuálu o německých leteckých materiálech.

Míchací poměry

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

Gel time

- nános do vrstvy 1 mm při různých teplotách

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

Mechanická data nezesílené pryskyřice

Hustota	g/cm3	1,18 - 1,20
Pevnost v ohybu	psi x 10³ N/ nm²	16 - 18 110 - 120
Modul pružnosti kN/mm²	psi x 10⁵	4,6 - 4,8 3,0 - 3,3
Pevnost v tahu kN/mm²	psi x 10³	10 - 11,5 70 - 80
Pevnost v tlaku kN/mm²	psi x 10³	18 - 20 120 - 140
Průtažnost	%	5 - 6,5
Síla nárazu Nmm/mm²		45 - 55
Pevnost ve střihu	D	80 - 85
Absorpce vody %	24 h 23 °C 7 d/ 23 °C	0,20 - 0,30 0,60 - 0,80
Odolnost proti únavě pod tlakem na obrácený ohyb dle DLR Brunsw. 90 %	10 %	 2 X 10⁴ 2 X 10⁶
Vytvrzení:	24 h při 23 °C	+ 15 h při 60 °C
Typická data dle WL 5.3203 Části 1 a 2 Manuálu o německých leteckých materiálech		

LAMINAČNÍ PRYSKYŘICE L 285
TUŽIDLO 500

Charakteristika

Schválení:	---
Použití:	Výroba kompozitních prvků Lodě a stavba lodí Sportovní nářadí Letecké modely Formy a nástroje
Teplotní odolnost výrobků bez výrazných změn jejich parametrů:	60 °C - □ + 50 - 60 °C bez tepelného vytvrzení
Zpracování:	Při teplotách mezi 10 °C a 40 °C Všechny obvyklé výrobní postupy
Zvláštní vlastnosti:	Extrémně dobrá fyziologická kompatibilita, dobré mechanické vlastnosti, velmi krátké doby vytvrzení dokonce i při nízké teplotě
Zvláštní úpravy:	L 285 T: tixotropní L 285 K2: horká tixotropní úprava L 285 W: bílá

Použití

Jedná se o systémy laminačních pryskyřic s nízkou viskozitou neobsahující rozpouštědla či plniva určená pro zpracování a vytvrzování při pokojové teplotě. Vhodná pro výrobu dílů se zesílením skelnými, uhlíkovými a aramidovými vlákny, jejímiž rysy jsou vysoká statická a dynamická nosnost.
Doba zpracovatelnosti (tzv. pot life) je přibližně 10 - 15 min. Laminačení pryskyřice L 285 v kombinaci s tužidlem 500 se vyznačuje velmi krátkou dobou vytvrzení, a to i při nízkých teplotách (dobré vytvrzení je zajištěno při teplotách začínajících u + 10 °C) Dokonce i při nepříznivých vytvrzovacích podmínkách, jako je nízká teplota či vysoká relativní vlhkost lze dosáhnout nelepivých povrchů s vysokým leskem.
Viskozita směsi byla upravena tak, že pryskyřice nestéká z tkanin rozložených na vertikálním povrchu.
Díky svým výborným přilnavým vlastnostem se tyto systémy rovněž dají použít jako adheziva pro dřevo, kov, sklo, beton a nesčetné druhy plastů. Tixotropní úprava (např. laminační pryskyřice L 285 T) je upřednostňována pro silnější adhezivní spoje a vertikální povrchy. Plniva (např. kovový prášek, prach, bavlněné vločky apod.) mohou být přimíchána pro dosažení speciálních vlastností systému.
Kvůli průtažnosti 4 - 7 %, což je výhodné při použití jako laminační pryskyřice, je pevnost ve střihu a odolnost proti odloupnutí o něco nižší než u našich speciálních adhezivních pryskyřic:
Adhezivní pryskyřice L 135 / K2 a
Adhezivní pryskyřice A 10 / A 20.

Všeobecným pravidlem při aplikaci všech adhezivních látek je pečlivá příprava povrchu, která je základním předpokladem dobré adheze. Zbytky rozpouštědel a nečistoty jako je prach, mastnota či kapky vody znemožní dobrou vazbu.

Specifikace

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

		Tužidlo 500
Hustota °C	g/cm 3 / 25	1,00 - 1,06
Viskozita °C	mPas / 25	200 - 350
Hodnota aminu	mg KOH / g	350 - 400
Barva Gardner		max 5

Podrobnosti pro zpracování

	Laminační pryskyřice L 285	Tužidlo 500
Průměrná hodnota epoxidu	0,63	-
Průměrný ekvivalent aminu	-	62
Skladování	□ 12 měsíců v originálním obalu	
Teplota při zpracování	10 - 50 °C	
Vytvrzování	Vytvrzování při pokojové teplotě nebo vytvrzování ve formě při vysokých teplotách.	
Temperování	Není nezbytné - možno při 50 °C - □ 150 °C	

Skladování

Pryskyřice a tužidla mohou být skladovány po dobu nejméně 12 měsíců v pečlivě utěsněných kontejnerech. Při teplotách pod + 15 °C mohou pryskyřice a tužidla zkrystalizovat. Krystalizace je patrná jako zamlžení či změna tekuté podoby obsahu kontejneru na pevnou. Před zpracováním se musí krystalizace zahřátím odstranit. Pomalu zahřejete až do přibližně 50 - 60 °C ve vodní lázni nebo peci a mícháním či potřásáním uvedete obsah kontejneru do původního stavu bez jakékoli vady na kvalitě. Zpracovávejte pouze výrobky zcela jednotné barvy. Před zahřátím lehce kontejner otevřete, aby došlo k vyrovnání tlaku. Během zahřívání buďte opatrní. Nezahřívejte nad otevřeným ohněm! Při míchání používejte bezpečnostní pomůcky (rukavice, brýle, respirátor).

Nárůst teploty
Optimální teplota při zpracování je v rozmezí mezi 20 a 25 °C. Vyšší teploty zpracování jsou možné, ale zkracují dobu zpracovatelnosti. Nárůst teploty o 10 °C zkrátí dobu zpracovatelnosti na polovinu. Voda (například velmi vysoká vlhkost nebo voda obsažená v plnivech) může způsobit zrychlení reakce pryskyřice / tužidlo. Rozdílné teploty a vlhkosti během zpracování nemají význačný efekt na pevnost vytvrzeného výrobku.
Nemíchejte velká množství, zvláště u tohoto vysoce reaktivního systému. Teplo sálající z nádoby, v níž dochází ke smísení, je velmi nízké, takže kvůli reakčnímu teplu (exotermická reakce pryskyřice-tužidlo) se obsah velmi rychle zahřeje. Mohou vzniknout teploty i vyšší než 200 °C, které mohou způsobit intenzivní hoření směsi pryskyřice a tužidla za výskytu kouře.

Gel time
- nános vrstvy o tloušťce1 mm při různých teplotách

20 - 25 °C	přibližně 45 - 60 min.
40 - 45 °C	přibližně 20 - 30 min.

Míchací poměry

	Pryskyřice L 285 : Tužidlo 500
Složky váhově	**100 : 40 (+/-2)**
Složky objemově	**100 : 50 (+/-2)**

Specifikované poměry míchání musejí být co nejpřesněji dodrženy. Přidání více či méně tužidla nebude mít efekt na rychlejší či pomalejší reakci - pouze nedostatečné vytvrzení, které nelze žádným způsobem opravit.
Směs pryskyřice a tužidla je nutno velice pečlivě promíchat. Míchejte, dokud nebude směs zcela jednotné barvy. Zvláštní péči věnujte stěnám a dnu nádoby, v níž směs mícháte.

Laminační pryskyřice L 285 - Tužidlo 500	
Max T_G pro vytvrzování při 18 °C	40 - 45 °C
Max T_G pro vytvrzování při 25 °C	50 - 60 °C
Max T_G pro vytvrzování při 50 °C	60 - 65 °C

DSC DIN 51007

Mechanická data nezesílené pryskyřice

Hustota g/cm3	1,18 - 1,20
Pevnost v ohybu psi x 10³ N/nm²	17 - 20 120 - 140
Modul pružnosti psi x 10⁵ kN/mm²	4,8 - 5,1 3,3 - 3,5
Pevnost v tahu psi x 10³ kN/mm²	10 - 11,5 70 - 80
Pevnost v tlaku psi x 10³ kN/mm²	18 - 20 120 - 140
Průtažnost %	5 - 6,5
Síla nárazu Nmm/mm²	40 - 50
Tvrdost ve střihu D	86 - 90
Absorpce vody % 24 h 23 °C 7 d/ 23 °C	0,10 - 0,20 0,20 - 0,50
Odolnost proti únavě pod tlakem na obrácený ohyb dle DLR Brunsw. 10 % 90 %	□ 2 X 10⁶ □ 2 X 10⁶
Vytvrzení: 24 h při 23 °C + 15 h při 50 °C	
Zastupující data dle WL 5.3203 Části 1 a 2 Manuálu o německých leteckých materiálech	

POZNÁMKA:
Překlad byl pořízen doslovně z manuálu "TECHNICKÉ INFORMACE" vydaného firmou MGS Kunstharzprodukte GmbH. Podrobnější či upřesňující informace Vám rádi podáme na telefonním čísle 585 129 011, na GSM: 603 847 655 (p.Havel) nebo 603 841 749 (p.Šuran).