

Ohybové chování laminátových struktur (spoilerů)

Václav Lecián

Bakalářská práce
2012



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická
Ústav výrobního inženýrství
akademický rok: 2011/2012

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Václav LECIÁN**
Osobní číslo: **T08622**
Studijní program: **B 3909 Procesní inženýrství**
Studijní obor: **Technologická zařízení**

Téma práce: **Ohybové chování laminátových struktur (spoilerů)**

Zásady pro vypracování:

- 1. Vypracování rešerše k dané problematice**
- 2. Příprava zkušebních těles**
- 3. Provedení mechanických zkoušek**
- 4. Vyhodnocení výsledků**

Rozsah bakalářské práce:

Rozsah příloh:

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

Seznam odborné literatury:

Dle doporučení vedoucího bakalářské práce.

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Milan Žaludek, Ph.D.**
Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání bakalářské práce: **13. února 2012**

Termín odevzdání bakalářské práce: **25. května 2012**

Ve Zlíně dne 10. února 2012


doc. Ing. Roman Čermák, Ph.D.
děkan




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

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce se zabývá vlivem použití skelné výztuže na mechanickou pevnost laminátu.

Teoretická část bakalářské práce popisuje základní mechanické zkoušky materiálu. Dále popisuje, co je laminát, jeho vlastnosti a výrobu.

V praktické části je popis výroby zkušebních těles a zkušebního stroje. Praktická měření byla provedena na zkušebních tělesech ze tří druhů skelné výztuže.

Klíčová slova: mechanické vlastnosti, laminát, tahová zkouška, ohybová zkouška, skelná výztuž

ABSTRACT

This thesis examines the influence of the use of glass reinforcement on the mechanical strength of the laminate.

The theoretical part describes basic mechanical material testing. It also describes what is laminate, its properties and production.

The practical part is a description of the production of test specimens and testing machines. Practical measurements were performed on specimens of three types of glass reinforcement.

Keywords: mechanical properties, fiberglass, tensile test, bending test, glass reinforcement

Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat vedoucímu bakalářské práce panu Ing. Milanovi Žaludkovi za vedení, rady a připomínky k práci. Dále rodičům, za uvolnění prostorů pro výrobu zkušebních těles.

Prohlašuji, že jsem na bakalářské/diplomové práci pracoval(a) samostatně a použitou literaturu jsem citoval(a). V případě publikace výsledků, je-li to uvedeno na základě licenční smlouvy, budu uveden(a) jako spoluautor(ka).

Ve Zlíně

.....

Podpis studenta

OBSAH

ÚVOD	8
I TEORETICKÁ ČÁST	9
1 MECHANICKÉ ZKOUŠKY MATERIÁLU	10
1.1 STATICKÉ ZATÍŽENÍ LAMINÁTU	11
1.1.1 Zkouška tahem	12
1.1.2 Zkouška tlakem	14
1.1.3 Zkouška ohybem	16
1.1.4 Zkouška smykem	18
1.2 DYNAMICKÉ ZATÍŽENÍ LAMINÁTU	20
1.2.1 Zkoušky rázové	21
1.2.2 Zkoušky opětovným namáháním	22
2 LAMINÁT	25
2.1 ROZDĚLENÍ LAMINÁTU	25
2.2 VLASTNOSTI POLYESTEROVÉHO LAMINÁTU	27
2.2.1 Laminát jako anizotropní materiál	27
2.3 VÝROBA SKELNÉHO LAMINÁTU	29
2.3.1 Polyesterové pryskyřice	29
2.3.2 Skelné výztuže	30
2.3.3 Iniciátory a vytvrzovače	32
2.4 TECHNOLOGIE LAMINÁTOVÁNÍ	33
2.5 UHLÍKOVÝ LAMINÁT	35
II PRAKTICKÁ ČÁST	37
3 PŘÍPRAVA ZKUŠEBNÍCH TĚLES CHYBA! ZÁLOŽKA NENÍ DEFINOVÁNA.	
3.1 VÝROBA POLOTOVARU ZE SKELNÉHO LAMINÁTU	40
3.2 DĚLENÍ MATERIÁLU-ŘEZÁNÍ NA ZKUŠEBNÍ TĚLESA	41
3.3 MĚŘENÍ ZKUŠEBNÍCH TĚLES.....	43
3.4 DĚLENÍ ZKUŠEBNÍCH TĚLES DO JEDNOTLIVÝCH SÉRIÍ.....	43
4 PROVEDENÍ MECHANICKÉ ZKOUŠKY	44
4.1 ZKOUŠKA OHYBEM.....	44
4.2 ZKUŠEBNÍ STROJ ZWICK 1456	45
4.3 MĚŘENÍ.....	CHYBA! ZÁLOŽKA NENÍ DEFINOVÁNA.
4.4 EXPERIMENTÁLNĚ NAMĚŘENÍ HODNOTY	48
5 VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ	56
ZÁVĚR	60
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	61
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	62
SEZNAM OBRÁZKŮ	63

SEZNAM TABULEK.....	65
SEZNAM GRAFŮ	66

ÚVOD

Lisovací hmoty na bázi syntetických pryskyřic musí vyhovovat spotřebiteli po stránce technologické i ekonomické. V technologickém hledisku je zahrnuta snadnost výroby a zpracování a vlastnosti výrobku, které se hodí pro zamýšlené použití. Ekonomická stránka je vyjádřena požadavkem dostupnosti surovin, levné výroby a zpracování bez nákladných investic. Tím je dán směr vývoje lisovacích hmot a snaha výrobců nabídnout spotřebiteli co nejširší paletu pryskyřic a umožnit mu tak výběr co nejvhodnější pryskyřice. Požadavek výroby výlisků s velmi dobrými mechanickými vlastnostmi bez použití velkých lisovacích tlaků a vysokých teplot vedl jednak k vyvinutí nízkotlakých pryskyřic a jednak k použití vláknitých plniv, které podobně jako ocelová armatura v betonu značně zlepšují mechanické vlastnosti výrobků. Postupem času byla celulózová a azbestová vlákna nahrazována tkaninami ze skleněných a syntetických vláken. Ve výrobku nesou tyto tkaniny, mající velmi dobrou mechanickou pevnost, hlavní část mechanického namáhání, a pryskyřice, která je bez armování poměrně křehká, se stává pojivem mezi jednotlivými vrstvami. Tak vzniká nový druh konstrukčního materiálu –vrstvené hmoty, lamináty.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 MECHANICKÉ ZKOUŠKY MATERIÁLU

V porovnání s nevyztuženými plasty není závislost vlastností kompozitů na teplotě, době zatížení a podmínkách prostředí (vlhkost vzduchu, agresivní média, UV záření) tak výrazná. Vliv na jejich chování při mechanickém namáhání má především vytvrzení matrice, rozložení plniva nebo vláken, orientace vláken, případně jejich zakřivení a zvláště obsah vláken. Proto je třeba při vzájemném srovnání vlastností nepominout velikost obsahu vláken.

Porušení, případně únavové procesy, jsou u vyztužených plastů mnohem složitější než u homogenních materiálů, např. kovů nebo nevyztužených plastů. U těchto materiálů určuje např. vznik, případně rychlost šíření jednotlivé trhliny, stav poškození, a tím vlastně i životnost materiálu.

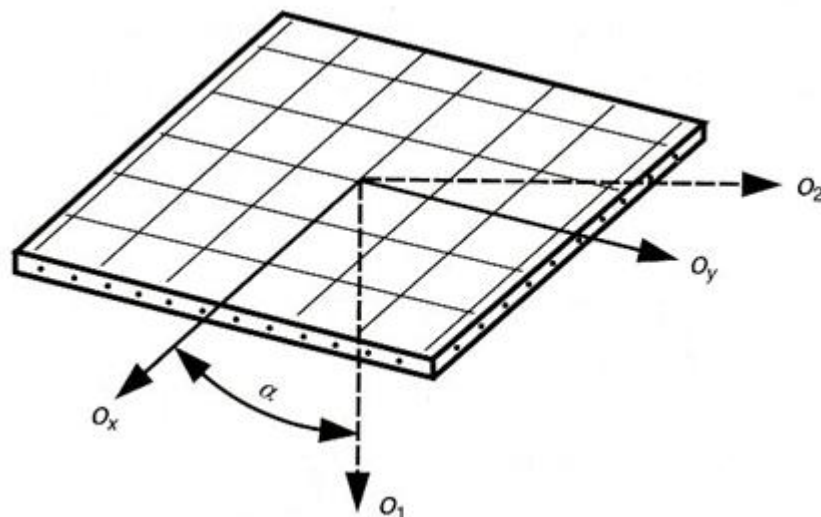
Při statických, stejně jako dynamických, zkouškách pevnosti kompozitů jsou to lokální poškození různého druhu, způsobující porušení nosných vláken, která předcházejí celkový lom materiálu. Zejména ve vrstvách, kde existuje nebezpečí vzniku mezivláknové poruchy, např. při zatížení tahem kolmo ke směru vláken nebo smykem pod úhlem 45° , mohou vzniknout trhliny, které se negativně projeví i u vrstev zatížených ve směru vláken. Z toho plyne, že vrstvy s orientací vláken 0° ke směru zatížení samy vykazují vyšší pevnost než stejné vrstvy ve spojení s vrstvami s orientací výztuže 90° ke směru zatížení, ve kterých dochází k prvním poruchám. Při zatížení tlakem je v takovém případě snížena lokální schopnost podepření vláken maticí, a je tak umožněno jejich lokální vybočení. Při zatížení tahem vedou lokální přerozdělení napětí a vzniklá vrubová napětí ke koncentracím napětí a vrubovým účinkům v přilehlých vrstvách. Ve smyslu 3. Paradoxu se též zvětšuje upínací délka. Vlivem různého působení lokálních poškození a jejich dalšího nového vzniku jsou proto při dynamickém zatěžování míjivá namáhání příznivější než střídavá.

Okrajové podmínky vlastní techniky provedení zkoušek často ovlivňují výsledek měření. V oblasti zavedení síly dochází k počátečním deformacím a k bránění v příčné kontrakci. To u vysokopevných a tuhých kompozitů s anizotropními vlastnostmi vyvolává zvýšenou úroveň trojrozměrné napjatosti v okolí upnutí zkušebních těles a může to výrazně ovlivnit výsledek zkoušky.

U laminátů zatížených víceosým namáháním existuje větší nebezpečí vzniku mezivláčnového poškození než u jednosměrně vyztužených vrstev při namáhání ve směru vláken. Vznik poškození závisí na druhu zatížení. Nepravidelnosti v uspořádání vláken, vzduchové bubliny, nedostatky v adhezním spojení složek se projevují jako koncentrace protažení a napětí. Podle druhu zatížení lze očekávat vznik tvorby různých typů trhlin.

Vyztužené plasty vznikají až při výrobě konstrukčního dílu a vykazují výraznou nehomogenitu a anizotropii. To musí být zohledněno nejen při vyšetřování jejich vlastností, ale též při výrobě zkušebních těles. Z důvodů anizotropie je k charakterizování vyztužených plastů nutný podstatně větší počet hodnot než u plastů nevyztužených.

Pro svoji vysokou pevnost jsou vyztužené plasty vhodné pro tenkostěnné konstrukce nacházející se v tzv. stavu rovinné napjatosti. Tato napjatost existuje např. v desce, která je zatížena silami působícími v její rovině (obr.1). [2]



Obrázek 1 – Znázornění hlavních os (ox, oy) ortotropního materiálu

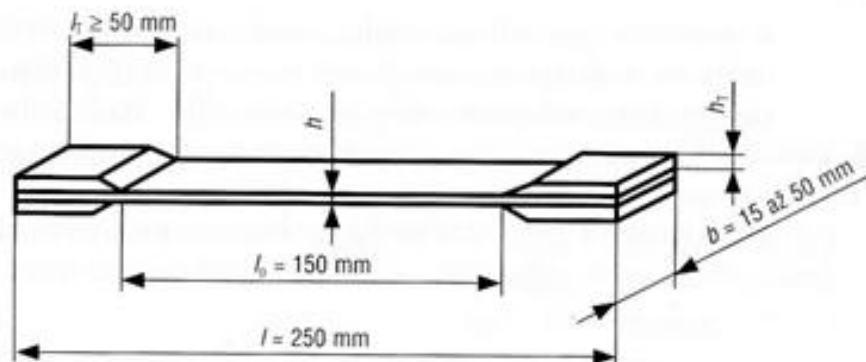
1.1 Statické zatížení laminátu

Pevnostní charakteristiky vykazují výraznější anizotropii než elastické, protože pevnosti nezávisí pouze na vlastnostech složek, ale ve větší míře také na jejich vzájemné adhezi. Zatímco jsou elastické charakteristiky dle norem většinou měřeny při nízkých zatíženích, při kterých vlivy struktury (např. bubliny, zbytková napětí, nedostatečná adheze) nehrají roli, projeví se tyto vlivy při vysokých zatíženích u zkoušek pevnosti, což mj. vede k velkým rozptylům měřených hodnot. Při vícené napjatosti nelze z těchto důvodů odvodit žád-

né srovnávací napětí jako u izotropních materiálů. Hypotézy porušení pro vyztužené plasty musí zohledňovat různé typy porušení v různých směrech zatížení, jakož i vícevrstvý charakter kompozitu, tj. vzájemnou pevnost vrstev mezi sebou (např. interlamiární smyk). V případě izotropních materiálů jde z důvodů materiálové symetrie o 2 srovnávací napětí, u transversálně izotropní jednosměrně vyztužené vrstvy je pro formulaci pevnostní podmínky potřeba znát 5 pevnostních charakteristik a v případě ortotropního materiálu 6 nebo 9 (např. u laminátu vyztuženého tkaninou s různým materiálem vláken v osnově a útku) [2].

1.1.1 Zkouška tahem

Pro kompozity je navrženo mnoho tvarů a geometrií zkušebních těles v příslušných normách (např. ČSN EN ISO 527-1 až 5), zohledňujících stavbu kompozitu. U laminátů s výztuží ve formě tkaniny a jednosměrně vyztužených laminátů se pro zkoušky v tahu osvědčila prizmatická tělesa se zesílením v místě upnutí (obr.2).

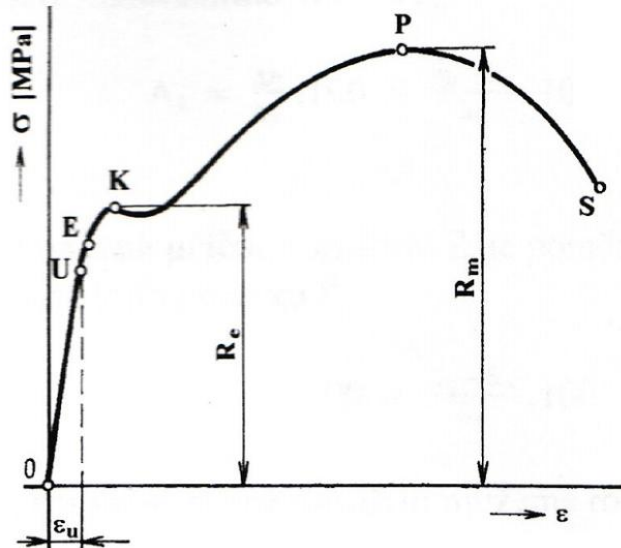


Obrázek 2- zkušební těleso pro zkoušku tahem

Materiál zesílení má mít modul pružnosti přibližně rovný modulu zkušebního tělesa a zesílení má být na konci ve směru k měrné délce tělesa zkoseno, aby se snížil vliv koncentrace napětí. Síla působí na vzorek smykem přes vrstvu lepidla. Lom má nastat uvnitř měrné délky, minimálně 10mm od konců zesílení.

Pevnost v tahu ve směru kolmo k vláknům lze mj. měřit na vinutých plochých zkušebních tělesech. Při měření elastických charakteristik musí být tělesa vyříznuta ze zkušební desky přesně ve směru os ortotropie. Rychlost zatěžování je 1% délky tělesa za minutu, přičemž nemá maximální deformace překročit 0,5%, aby nenastalo ovlivnění oblastmi, kde se již tvoří poškození [2].

Trhací stroje kreslí v průběhu zkoušky pracovní diagram závislosti zatěžující síly F na změně délky ΔL . V diagramu (obr.3) můžeme sledovat několik charakteristických bodů a jim odpovídajících napětí [1].



Obrázek 3- Pracovní diagram

U této zkoušky zjišťujeme (značení pro kovy):

Pevnost v tahu R_m - (mez pevnosti v tahu) je největší napětí, které snesl zkušební vzorek a je dáno podílem největší zatěžující síly F_{max} a původního průřezu vzorku S_0 .
 $R_m = F_{max} / S_0$ [MPa]

Pevnost v kluzu R_e - je napětí, při němž se zkušební vzorek začne výrazně prodlužovat, aniž by stoupala zatěžující síla, nebo při němž nastává prodlužování doprovázené poklesem zatěžující síly. $R_e = F_k / S_0$ [MPa]

Poměrné prodloužení ε - je dáno poměrem délky $\Delta L = L_u - L_0$ k původní délce tyče L_0 .
 $\varepsilon = \Delta L / L_0$ [-]

Tažnost A - je poměrné prodloužení vyjádřené v procentech. $A = \varepsilon \cdot 100$ [%]

Zúžení Z – je dáno poměrem změny průřezu vzorku po přetržení $\Delta S = S_0 - S_u$ k původnímu průřezu tyče S_0 . Zúžení se vyjadřuje v procentech. $Z = (\Delta S / S_0) \cdot 100$ [%]

Charakteristické body:

Mez úměrnosti U – napětí je přímo úměrné deformaci. Do meze úměrnosti platí Hookův zákon. V diagramu je oblast mezi body 0 a U tvořena přímkou.

Mez pružnosti E – smluvní hodnota napětí vyvolávající trvalou deformaci určité velikosti. V praxi se stanovuje napětí způsobující trvalou deformaci o velikosti 0,005% L_0 . Zjišťování této meze je obtížné a zdlouhavé.

Mez kluzu K – napětí, při němž se začne zkušební vzorek výrazně prodlužovat, aniž by stoupala zatěžující síla. U některých materiálů se neprojevuje výrazná mez kluzu a proto se jako smluvní hodnota meze kluzu bere napětí způsobující trvalé prodloužení 0,2%.

Mez pevnosti P – největší napětí, které snesl zkušební vzorek.

Bod S - bod, kdy dojde k přetržení zkušební vzorku [2].

1.1.2 Zkouška tlakem

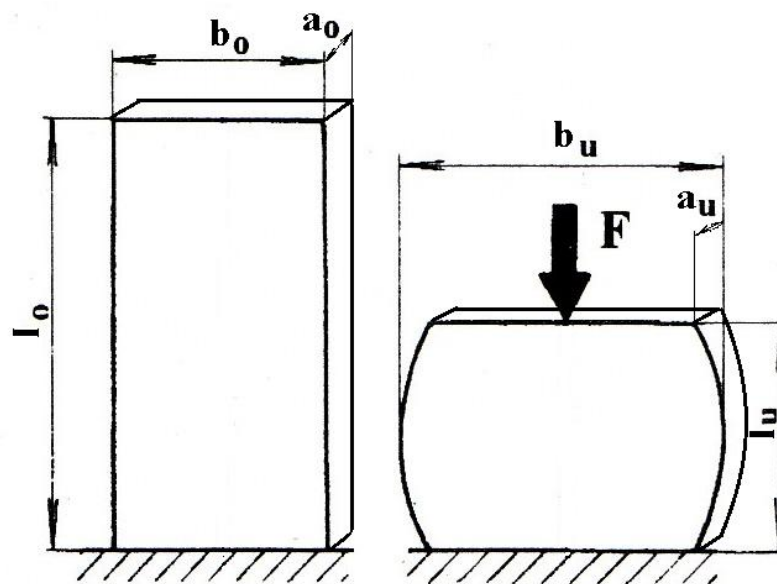
Z důvodů nebezpečí ztráty stability při určování pevnosti v tlaku jednosměrně vyztuženého laminátu musí být zkušební vzorek pečlivě navržen. Vhodná jsou pravoúhlá prizmata, válce nebo trubky, neboť zajišťují symetrické zatížení.

Při dobré adhezi vlákno-matrice nastává lom vlivem smyku, při špatné adhezi vlivem delaminace.

Aby se odstranilo rozvrstvení v kontaktní rovině se zatěžovacím zařízením, byly navrženy různé opěrné přípravky, sloužící také k vyloučení vybočení zkušební tělesa.

Při zatížení tlakem je obtížné v celém zkušebním tělese realizovat jednoznačně čistý stav napjatosti během celé zkoušky. Plochy sloužící k zavedení vnějšího zatížení musí být zcela rovné a rovnoběžné. Zeslabení tloušťky stěny vede k rozdílům v odolnosti vůči ztrátě stability. Musí existovat jednoznačně homogenní stavy napjatosti i přetvoření a dobrá přístupnost k měřené oblasti.

Zkušební tělesa (obr.4) pro zkoušku tlakem lze stabilizovat připevněním zesílení k jejich koncům. Tvar zesílení může významně ovlivnit výsledky zkoušek, zejména při zkouškách za zvýšených teplot [2].



Obrázek 4 – zkušební těleso před a po zkoušce tlakem

U této zkoušky zjišťujeme (značení pro kovy):

Pevnost v tlaku R_{mt} - je poměr největší zatěžující síly F_{max} v okamžiku, kdy zkušební vzorek praskne nebo stlačí na určitou hodnotu a původního průřezu zkušební vzorku.

$$R_{mt} = F_{max} / S_0 \text{ [MPa]}$$

Poměrné zkrácení A_t - je poměr zkrácení zkušební vzorku $\Delta l = l_0 - l_u$ k původní délce zkušební vzorku h_0 . $A_t = (\Delta h / h_0) \cdot 100 \text{ [%]}$

Poměrné příčné rozšíření Z_t – je poměr změny průřezu $\Delta S = S_u - S_0$ k původnímu průřezu zkušebního vzorku S_0 . $Z_t = (\Delta S / S_0) \cdot 100$ [%] [3]

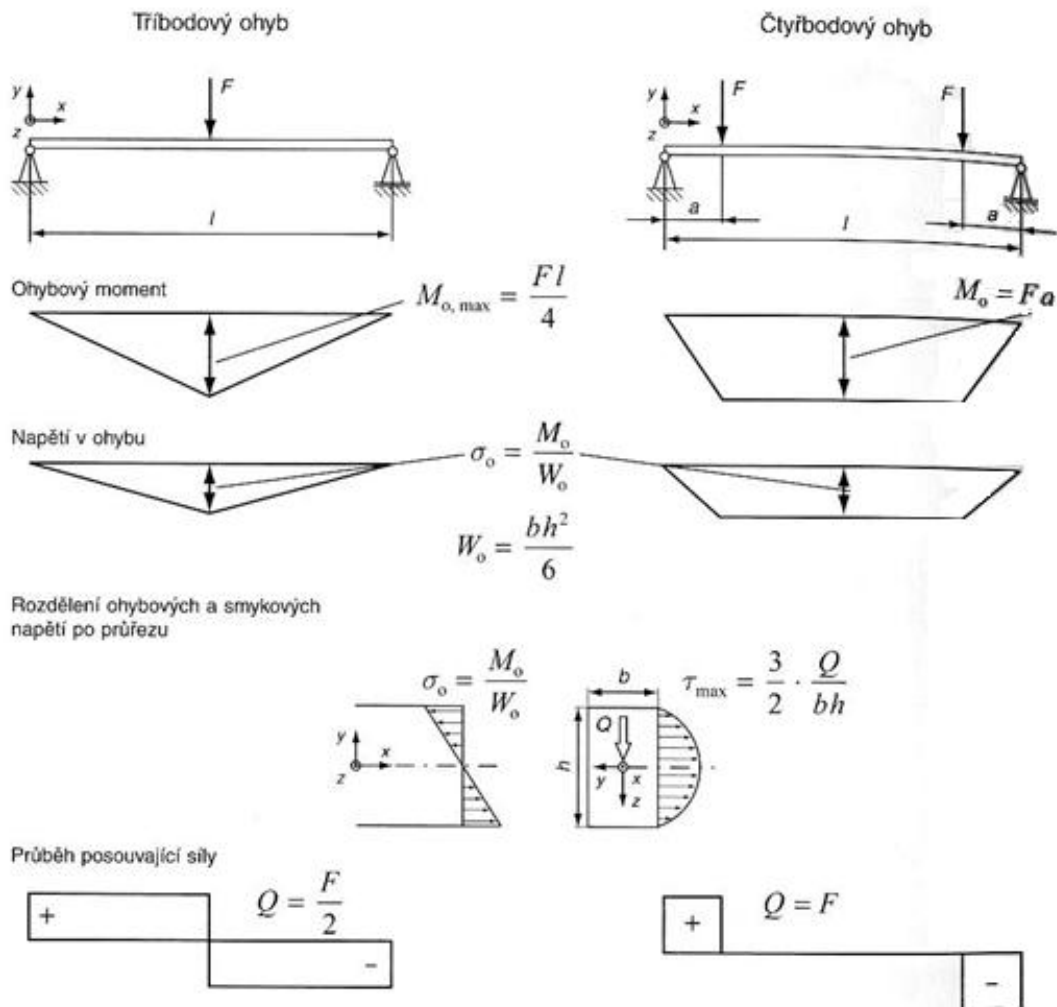
1.1.3 Zkouška ohybem

Při stanovení elastických a pevnostních charakteristik zkouškou ohybem se předpokládá lineární rozdělení normálních napětí po průřezu. Hodnoty pevnosti v ohybu závisí výrazně na poloze vláken vzhledem k neutrální rovině.

Zkouška ohybem probíhá při tří- nebo čtyřbodovém uložení. Výhoda zkoušky čtyřbodovým ohybem spočívá v konstantním ohybovém momentu M_0 po celé délce rozteče uložení vzorku, což je především významné při stanovení modulu pružnosti.

Při zkoušce třibodovým ohybem existuje ve zkušebním tělese napjatost s maximálním zatížením a definovaným místem lomu v bodě zatížení, tj. ve středu délky tělesa. maximální smykové napětí leží mezi vrstvami uprostřed tloušťky tělesa.

Stanovené veličiny mají v první řadě význam srovnávací. Také zde je nutné sledovat druh porušení. Akceptovatelný druh porušení ohýbaného nosníku je porucha vzorku lomem vyvolaným tlakem nebo tahem. Rovněž při ohybu existuje řada norem pro různé druhy vyztužení, např. 14125 [2].



Obrázek 5- Průběh ohybových momentů při zkoušce tří- a čtyřbodovým ohybem

U této zkoušky zjišťujeme (značení pro kovy):

Pevnost v ohybu R_{mo} – je dána poměrem největšího ohybového momentu $M_{o \max}$ a modulu průřezu v ohybu W_o . Je to napětí, při kterém se zkušební tyč přelomí.

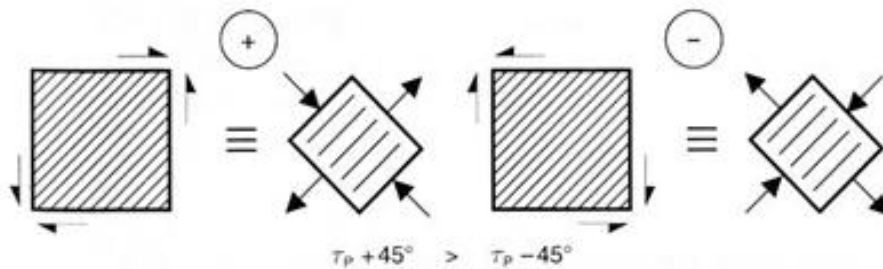
$R_{mo} = M_{o \max} / W_o$ [MPa]. Ohybový moment je $M_{o \max} = (F.l)/4$ [N.mm], modul průřezu v ohybu pro kruhový průřez $W_o = (b.d^3)/32$ [mm³] a pro obdélníkový průřez $W_o = (b.h^2)/6$ [mm³].

Poměrný průhyb ϕ – je dán poměrem absolutního průhybu v okamžiku lomu y_p , který se měří uprostřed vzorku ve směru působící síly, a délky tyče L . $\phi = y/L \cdot 100$ [%][4]

1.1.4 Zkouška smykem

Ke zvláštnostem kompozitních materiálů patří též závislost pevnosti ve smyku na směru zatížení.

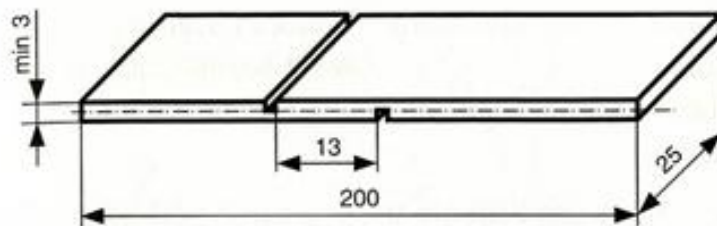
Únosnost jednosměrně vyztuženého laminátu při tahu ve směru vláken je mnohem vyšší než ve směru kolmo na vlákna. Při namáhání tlakem je tomu naopak. To způsobuje závislost pevnosti ve smyku na směru namáhání. Je-li jednosměrný laminát namáhán smykovým napětím působícím ve směru skloněném ke směru vláken o úhel 45° , pak ve směrech rovnoběžném a příčném k vláknům působí jen normálová napětí. Působí-li smyková napětí ve smyslu označeném jako +, pak je příčné namáhání tlakové. Při smyslu označeném – je toto napětí tahové. Z toho plyne, že pevnost ve smyku je v druhém případě menší než v prvním (obr.6). [2]



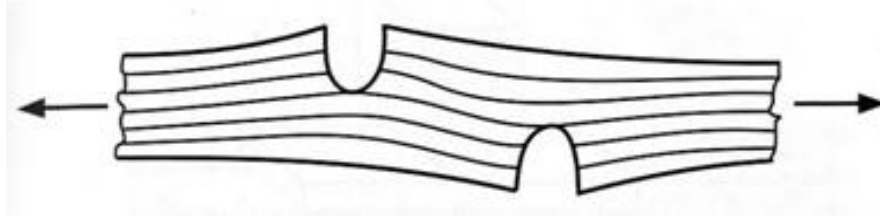
Obrázek 6- Vliv směru smykových napětí na způsob zatížení

Realizace namáhání při prostém smyku je obtížná, nejvhodnější jsou zkušební tělesa tvaru trubky namáhána krutem.

Jednou z charakteristik kvality laminátových kompozitů je interlaminární (mezivrstvá) pevnost ve smyku. Používají se různá zkušební tělesa (obr.7), aby se minimalizoval vliv ohybové tuhosti, kterou může být vyšetřovaná vlastnost ovlivněna.

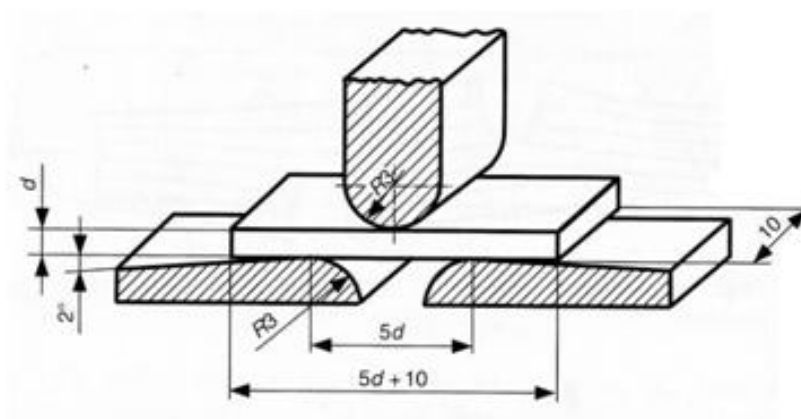


Obrázek 7- Zkušební těleso ke stanovení interlaminární pevnosti ve smyku



Obrázek 8- Ohybové přetvoření zkušebního tělesa pro určení interlaminární smykové pevnosti

Interlaminární pevnost ve smyku jednosměrně vyztužených laminátů nebo laminovaných kompozitů mezi různými vrstvami lze stanovit na krátkém tříbodově ohýbaném vzorku zkouškou zvanou Short-Beam Test (ČSN EN ISO 14130) (obr.9), při němž vzniká lom vlivem maximálního smykového napětí, působícího v neutrální rovině krátkého nosníku.



Obrázek 9-Zkouška říbodovým ohybem ke stanovení interlaminární smykové pevnosti

Zkouška je vhodná pro kontrolu kvality, méně však jako veličina pro konstrukční použití. Proto se také hovoří o zdánlivé interlaminární smykové pevnosti.

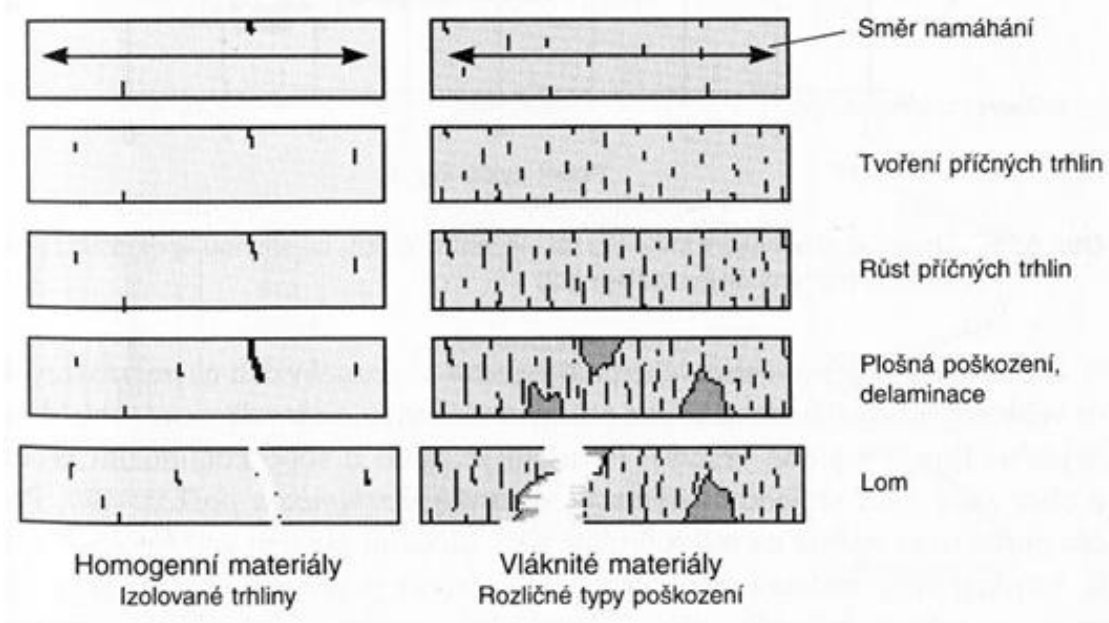
Při Short-Beam testu z vyjádření poměru maximálního ohybového napětí a smykového napětí v neutrální ose nosníku vyplývá nutnost krátké rozteče l podpor uložení a velkého poměru tloušťky h vzorku k rozteči uložení.

Aby nedošlo k lomu vlivem ohybového namáhání, ale vlivem smyku, je nutné volit krátký vysoký vzorek.

Pouze při tříbodovém ohybu působí pro příčné smykové napětí relativní příčná síla po celé délce vzorku. Proto má smysl provést zkoušky, při nichž je rozhodující smykové napětí, na přípravku pro tříbodový ohyb. A pouze tehdy kdy dojde k čistému porušení smykem v jedné nebo více rovinách laminátu, lze požadovat stanovenou hodnotu za interlaminární smykovou pevnost. V případě kombinovaného porušení stříhem, tlakem nebo tahem nelze o pevnosti ve smyku hovořit [2].

1.2 Dynamické zatížení laminátu

Kompozitní materiály vyztužené dlouhými vlákny na jedné straně umožňují optimalizaci jejich struktury s ohledem na předpokládaný způsob namáhání, na dlouhé straně však důsledkem jejich mikro- i makroskopicky heterogenní struktury (náhlé změny tuhosti na rozhraní matrice a vláken a mezi různými vrstvami, směrově závislé mechanické charakteristiky) existuje značná rozmanitost ve způsobu a průběhu porušování (obr. 10). Většina těchto mechanismů poškozování se u homogenních materiálů (jako např. kovů nebo nevyztužených plastů) nevyskytuje, což často činí konstruktérům, zvyklým pracovat s izotropními materiály, problémy správně pochopit a interpretovat chování kompozitů při únavovém namáhání. Pro kovové materiály je typické, že při cyklickém namáhání se vytvoří lokálně působící trhliny, jejíž růst a kritickou velikost lze popsat aparátem lomové mechaniky. U vláken vyztužených kompozitů je poškozování při dynamickém namáhání provázeno vznikem a rozvojem různých typů poruch ve velkém objemu materiálu, které jednotlivě nemají takový význam jako trhliny v kovovém materiálu. U kompozitů může být růst trhliny zastaven sousedící pevnější složkou seriálu.



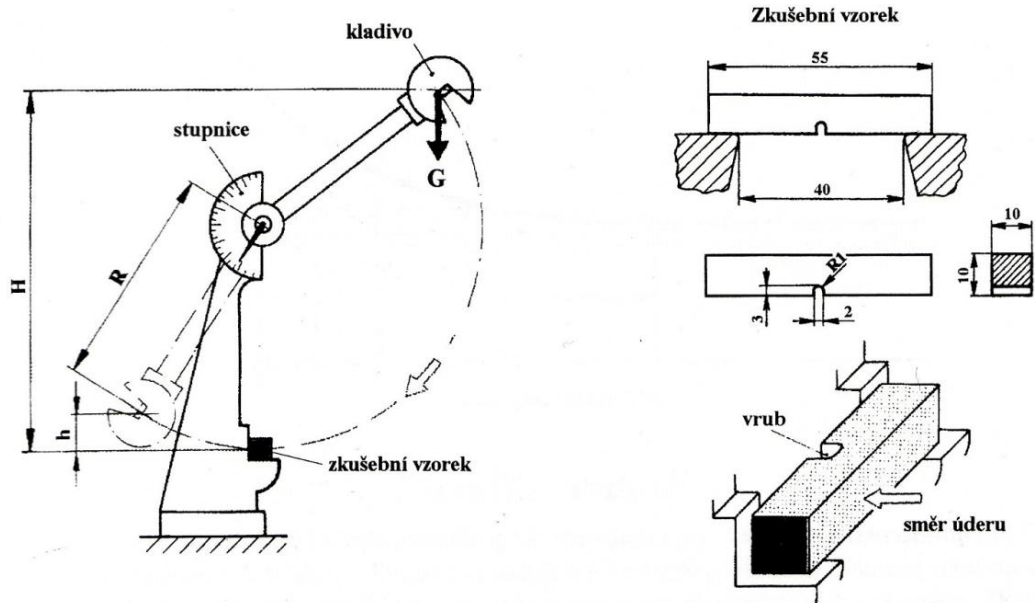
Obrázek 10 – Průběh poškozování u homogenních a vláknitých materiálu

Typy poškození, které se vyskytují u vlákniny vyztužených kompozitů, se dělí často do těchto skupin:

- porušení soudržnosti vlákna s matricí
- trhlina v matrici
- lom vlákna
- porušení soudržnosti mezi jednotlivými vrstvami, hlavně u vrstvených materiálů při postupujícím procesu únavy [2]

1.2.1 Zkoušky rázové

Tyto zkoušky se používají ke zjišťování houževnatosti materiálu. Měřítkem houževnatosti je energie potřebná k porušení zkušební tělesa. Zkoušky se mohou uskutečnit při namáhání v tahu, tlaku, ohybu a krutu stejně jako zkoušky statické. Nejznámější a nejpoužívanější je rázová zkouška v ohybu, která se provádí především u ocelí. Zkušební vzorky z ocelí se opatřují vrubem, protože jinak by vlivem vysoké houževnatosti nedošlo k porušení materiálu. Vrubovou houževnatost zjišťujeme na Charpyho kladivu (obr.11). Zkouška probíhá tak, že kladivo o hmotnosti G se zvedne a upevní se v počáteční poloze H . V nejnižším bodě dráhy se umístí zkušební vzorek. Po uvolnění kladivo tyč přerazí a vykývne do konečné polohy h [5].



Obrázek 11 – Charpyho kladivo a zkušební vzorek

U plastů a vlákny vyztužených materiálů se jako zkušební těleso používá pás o délce l , šířce $b=10\text{mm}$ a tloušťce 4mm . Zkušební těleso se pokládá na ležato nebo stojato podle požadavků zkoušky.

U této zkoušky zjišťujeme (značení pro kovy):

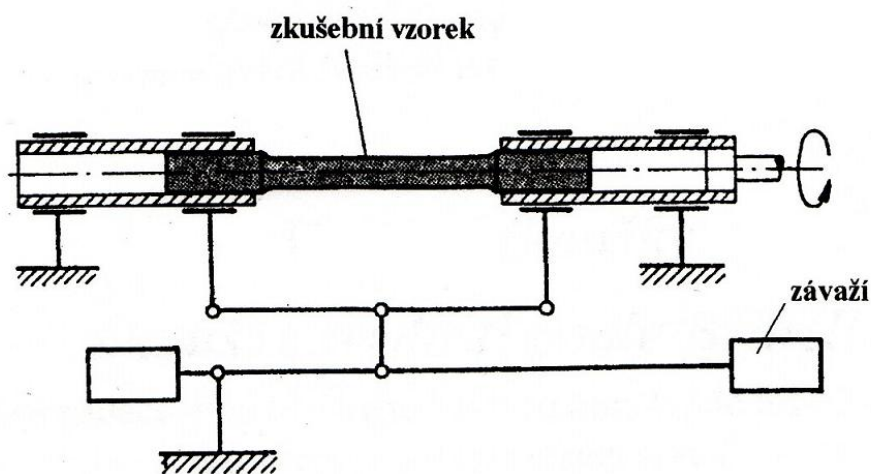
Nárazová práce KU – práce po přeražení zkušebního vzorku, $KU = G \cdot (H-h)$ [J].

Vrubová houževnatost KCU – je to podíl nárazové práce KU a původního průřezu S_0
 $KCU = KU / S_0$ [J/cm²].

1.2.2 Zkoušky opětovným namáháním

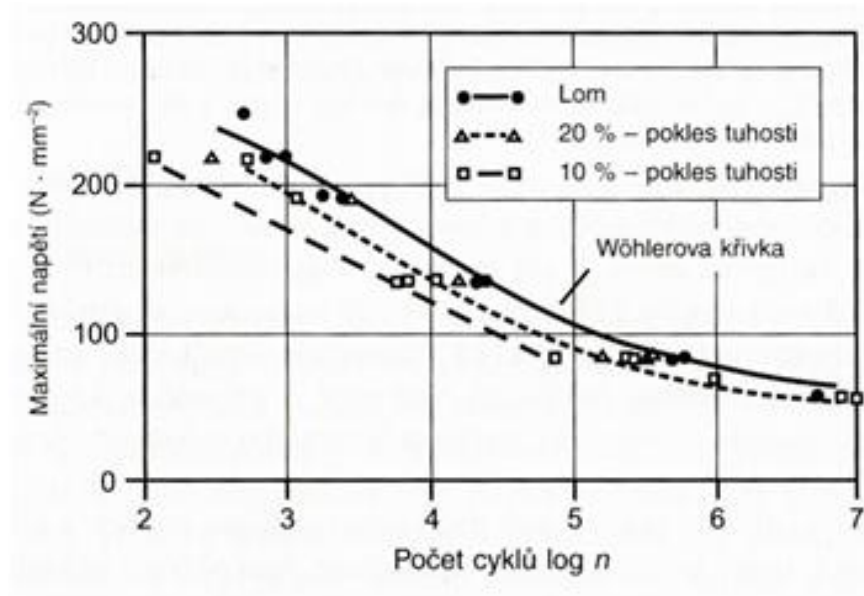
Těmto zkouškám se říká zkoušky únavy. Při namáhání součásti vznikají často poruchy dříve, než odpovídá jeho statické pevnosti. Tento jev se nazývá únava materiálu. Nebezpečí lomu z únavy vzniká jen při překročení určité hranice, která se nazývá mez únavy. Únavu ovlivňuje druh napětí, při namáhání tah-tlak platí, že převládající tahové napětí snižuje mez únavy, převládající tlaková napětí naopak mez únavy zvyšují. Dále mez únavy snižují ostré změny průřezů, zářezy, otvory a špatný nebo zkorodovaný povrch materiálu. Únavu

zjišťujeme na Schenckově přístroji (Obr.12). První zkušební tyč je zatížena na určitou hodnotu a poté počítáme počet cyklů do lomu. U dalších tyčí postupně snižujeme napětí až do okamžiku, kdy nám tyč nepraskne. Získané hodnoty vynášíme do závislosti počet cyklů na napětí a proložíme jimi Wohlerovu křivku. Tato křivka se asymptoticky blíží k mezi únavy. Mez únavy je napětí, při kterém součást vydrží nekonečný počet cyklů. V praxi stanovujeme smluvní mez únavy, což je napětí, při kterém vydrží součást počet cyklů stanovených jako základ zkoušky [6].



Obrázek 12 – Schéma Schenckova přístroje pro zkoušky opětovným namáháním

Wöhlerova křivka je i pro kompozity vyztužené vlákny nejčastěji používána k popisu jejich únavového chování. Kritériem únavy je lom, tj. úplné porušení zkušebního tělesa. Vyhodnocení výsledků zkoušek statickými postupy dovoluje poměrně dobře hodnotit vhodnost materiálů pro jejich využití v podmínkách únavového namáhání (obr.13).



Obrázek 13 – Wöhlerova křivka

Pro dynamicky zatížené části je lom, pokud se zřetelně projeví, jakožto jediné kritérium únavy nedostatečný, neboť většina vlákniny vyztužených plastů s rostoucí dobou zatížení a postupující únavou více nebo méně vykazuje pokles tuhosti. Tento pokles je přípustný např. při použití vlákniny vyztužených plastů pro konstrukční prvky, kde se může změna vlastností s počtem cyklů měnit v jistých mezích. Vezmeme-li jako kritérium únavy určitý pokles tuhosti (obvykle o 10 nebo 20%) a vyneseme-li tyto body do Wöhlerova diagramu, získáme tak další informace o časovém průběhu únavy. Ke stanovení zbytkové pevnosti je pak zkušební těleso po určitém počtu cyklů zatížení podrobena statické zkoušce [2].

2 LAMINÁT

Laminát je druh kompozitního materiálu, který tvoří několik vrstev tkaniny, rohože nebo jiné struktury, impregnovaných vhodnou pryskyřicí nebo jiným lepidlem. Mezi jeho klady patří skvělá pevnost a pružnost při zachování nízké hmotnosti. Laminát se výborně tvaruje a je relativně jednoduché ho zpracovat. Vyrábí se často lisováním za vyšších teplot, tento proces se nazývá laminace. Velmi častým použitím laminace je zatavení listu papíru mezi dvě fólie. Podobně jsou vyrobeny i čelní skla automobilů - mezi dvě vrstvy skla je vlepena silná fólie. Používá se často v letectví (výroba větroňů), automobilovém průmyslu, na sportovní náčiní (lodě) nebo například na střešní krytiny či podlahové krytiny [7].

2.1 Rozdělení laminátů

Lamináty se vyrábějí lisováním a podle lisovacích tlaků se dělí na *kontaktní* (beztlakové), *nízkotlaké* (cca do 30kg/cm^2) a *vysokotlaké* (až několik set kg/cm^2).

Melaminformaldehydové kondenzáty – patří do vysokotlakých pryskyřic pro vrstvené hmoty. Používají se pro výrobu dekoračních materiálů a elektroizolačních desek. Vynikají značnou tvrdostí a mají světlou barvu a výborně dielektrické vlastnosti. Jelikož je pryskyřice téměř bezbarvá, dá se vybarvovat na světlé pastelové odstíny. Podmínkou pro dosažení dokonale lesklých povrchů je použití poměrně vysokých teplot a tlaků při lisování. Impregnuje se vodnými roztoky pryskyřic, musí se však odpařit poměrně značná kvanta vody.

Fenoplasty – první pryskyřice pro lisování středními nebo nízkými tlaky. Patří sem rezoly a novolaky. Rezolovými pryskyřicemi s vhodnou konzistencí se impregnuje přímo, novolakovými pryskyřicemi v alkoholických roztocích. Rozpouštědlo se musí před lisováním odpařit, takže nevýhodou novolaků je manipulace s rozpouštědly, kterou však vyžaduje suchý povrch impregnovaného materiálu. Při vytvrzování v lisu se uvolňují plynné zplodiny – vodní pára, formaldehyd, popř. čpavek. Pryskyřice mají dobrou tepelnou vodivost a jsou levné.

Furanové pryskyřice – jsou levné a vyznačují se velkou tepelnou i chemickou odolností. Jsou málo rozšířené, kvůli obtížné výrobě a zpracování, mají horší mechanické vlastnosti, tmavé zbarvení a při lisování se z nich uvolňují těkavé zplodiny.

Epoxidové pryskyřice - Vyrábějí se alkalickou kondenzací dichlórhydrinu nebo epichlórhydrinu a bis-4-fenoxypropanu-2,2. Konsistence pryskyřice se řídí vzájemným poměrem obou složek. Sklotextil se impregnuje buď roztokem pryskyřice v interním rozpouštědle, které se musí po impregnaci odpařit, nebo v rozpouštědlech, jež se aktivně účastní vytvrzování a prakticky beze zbytku se zabudují do prostorové mříže. Takovými aktivními rozpouštědly jsou např. glykol-bis-glycidéter, alyl-glycidéter nebo některé monomery jako styren. Epoxidové pryskyřice mají dobrou adhézi ke skelnému vláknu a malou objemovou kontrakci při vytvrzování (do 4%). Obojí dodává laminátům dobré mechanické vlastnosti a lepší odolnost proti vodě než polyester. Epoxidové pryskyřice se oproti polyesterovému vyznačují lepšími mechanickými, zejména dynamickými, vlastnostmi, použitím vhodných tvrdidel lze získat i vyšší teplotní odolnost až do 180°C. Neobsahují škodlivý styren. Epoxidových pryskyřic je řada typů. Vhodných technologických vlastností, zejména snížení viskozity, se dosahuje mísením epoxidových pryskyřic s reaktivními ředidly, kterých se nabízí velký výběr. Volbou správného typu lze zlepšit i další vlastnosti pojivového systému, např. teplotní odolnost a snížení hořlavosti. Specialitou jsou hybridní pryskyřice, které jsou kombinací běžných polyesterových a polyuretanových pryskyřic.

Alylové pryskyřice – Jsou to v podstatě estery a étery amylalkoholu, který je spolu s alylchloridem výchozí surovinou pro jeho výrobu. Vzájemnou kombinací těchto sloučenin nebo jejich kopolymerací s jinými monomery se dosahuje poměrně širokého výběru požadovaných vlastností. Protože jsou to látky nízkomolekulární, které se dají dobře čistit destilací nebo krystalizací, dávají polymeraci zcela bezbarvé produkty, což je někdy žádoucí (optické materiály). Nevýhodou je relativně malá reaktivita alylových sloučenin, takže k vytvrzování dochází teprve při teplotách nad 50°C.

Nenasycené polyester – vznikají esterifikací dvojsytných kyselin dvojmocnými alkoholy. Komerční výrobky jsou roztokem těchto pryskyřic ve vhodném monomeru. Patří mezi jedny z nejmladších pryskyřic. Základní reakce je sice již velmi dlouho známa, avšak pryskyřice schopné praktického použití vznikly až těsně před druhou světovou válkou. Dnes se vyrábějí ve velkém měřítku a v mnoha typech vhodných pro nejrůznější účely např. pojivo pro lamináty, zalévací hmoty, bezrozpouštědlové laky.

Polyesterové pryskyřice - Ty se podle své chemické struktury dělí na ortoftalové, izoftalové a tereftalové typy, v tomto pořadí obecně stoupají jejich mechanické vlastnosti, teplotní a chemická odolnost. Ještě lepších vlastností lze dosáhnout použitím vinylesterových pryskyřic s teplotní odolností až do 160°C a dlouhodobou chemickou odolností vůči většině agresivních látek např. kyselinám, hydroxidům a rozpouštědlům. Pryskyřice se pro zlepšení zpracovatelských podmínek dodávají i s přísadkou urychlovačů, speciálních voskových složek pro snížení odparu zdraví škodlivého styrenu případně s přísadkou thixotropních složek, upravujících viskozitu a snižujících stékání pryskyřice ze svislých stěn. Tyto pryskyřice se však často používají i samostatně jako konečná vrstva povrchové úpravy, která zaručuje maximální odolnost povrchu. Tyto typy jsou však většinou ještě upravovány dalšími aditivami pro odolnost vůči UV záření nebo barvivy pro získání určitého odstínu[5].

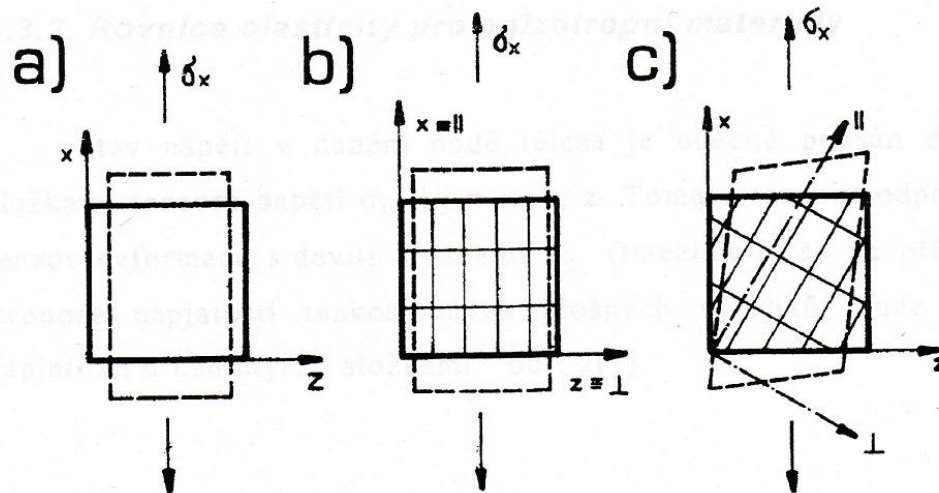
2.2 Vlastnosti polyesterového skelného laminátu

- Výborná elektroizolační schopnost
- Nemagnetičnost
- Dobrá propustnost elektromagnetického vlnění
- Malá tepelná vodivost
- Dobrá odolnost proti působení povětrnosti
- Dobrá odolnost proti působení četných chemikálií
- Dobrá propustnost světla

2.2.1 Laminát jako anizotropní materiál

Plošné výrobky vyztužené dlouhými vlákny jsou obvykle vícevrstvé, s úhlovým vrstvením několika vrstev (tzv. lamin). Každá lamina obsahuje obvykle jedinou výztužnou vrstvu jednosměrnou či vícesměrnou, a je proto příliš tenká, než aby se jí dalo použít přímo k jakékoliv aplikaci. Struktura vzniklá kladením více vrstev – lamin s různou orientací a vlastnostmi se nazývá laminát. Výsledné vlastnosti laminátu závisejí na jeho struktuře a vlastnostech jednotlivých lamin.

Obecně mohou být lamináty anizotropními materiály, tj. takovými, které vykazují různé mechanické vlastnosti v různých směrech. Je-li struktura plošného prvku souměrná ke dvěma navzájem kolmým osám, mluvíme o zvláštním případě anizotropie vlastností – o entropii[4].



Obrázek 14 – Mechanické chování a) izotropního, b) ortotropního a c) obecně anizotropního plošného prvku

Jednoosé napětí působí v izotropní vrstvě pouze podélnou a příčnou normálovou deformaci, úhly prvku zůstávají zachovány. Obdobně se chová ortotropní prvek, působí-li napětí ve směru některé osy symetrie jeho struktury. Obecně je však odezva materiálu různá ve směrech x a z , tj. napětí působící ve směru x vyvolá jiné hodnoty podélné a příčné deformace než stejné napětí, působící ve směru osy z . Osy souměrnosti ortotropního prvku jsou nazývány rovněž jeho přirozenými osami. Nepůsobí-li napětí ve směru jedné z těchto os, vznikají nejen normálové, ale i smykové deformace – prvek se chová jako anizotropní.

Specifickou vlastností anizotropních materiálů je, že normálová napětí vyvolávají obecně nejen normálové, ale i smykové deformace, smyková napětí pak nejen smykové, ale i normálové deformace. S tímto vzájemným ovlivňováním normálových i smykových efektů jsme se se u izotropních materiálů nesetkali. Složitější mechanické chování v případě ortotropie a izotropie znamená, že počet elastických konstant bude vyšší než u izotropních materiálů[4].

2.3 Výroba skelného laminátu

Skelný laminát se vyrábí ze skelných vláken prosycených pryskyřicí. Sklo se používá jako provazec, tkanina nebo rohož. Pevnost běžně vyráběného laminátu v tahu je podobná pevnosti normální oceli, protože tah přenáší sklo. Naopak namáhání v tlaku přenáší pryskyřice, která má ještě vysoké pevnosti, asi třetinu pevnosti oceli. Se vzpěrem, dynamickým namáháním a stabilitou konstrukcí je to horší, laminát je výborný materiál, ale konstrukce musí odpovídat jeho specifickým vlastnostem. K dosažení vyšší pevnosti v tahu se musíme snažit mít co nejvíce skla a co nejméně pryskyřice, přitom však musí být každé vlákno obaleno, nesmí zůstat neprosycená místa. Bubliny vzduchu také snižují pevnost. Proto má laminát lisovaný pod velkým tlakem značně vyšší pevnost, než laminát vyráběný vytvrzováním bez tlaku. Polyesterové skelné lamináty jsou vrstvené hmoty, které se vyrábějí tak, že jednotlivé vrstvy skelné tkaniny nebo jiné skleněné výztuže se impregnují a vzájemně spojují polyesterovou pryskyřicí. Řadíme je mezi reaktoplasty, i když za zvýšené teploty částečně měknou.

2.3.1 Polyesterová pryskyřice

Pryskyřice slouží jako pojivo skelné výztuže, rozvádí zejména mechanické namáhání rovnoměrně na všechna vlákna výztuže a chrání je před mechanickým nebo chemickým poškozením. Základními surovinami pro výrobu pryskyřic jsou nenasycené dikarbonové kyseliny, dvojmocné alkoholy a monomery, ve kterých se vyrobený polyester rozpouští.

Polyesterové pryskyřice se prodávají v několika typech:

Univerzální typ pro výrobu laminátu- Podle rychlosti vytvrzování můžeme pryskyřice rozdělit na velmi reaktivní, středně reaktivní a málo reaktivní. Reaktivita závisí na množství a druhu stabilizátoru a na nenasycenosti pryskyřice. Nenasycenost zvyšuje nejen reaktivitu, ale i tvrdost a tepelnou odolnost. Tvrdé typy dávají lamináty s větší tepelnou odolností, naopak z méně reaktivních vznikají pružnější a ohebnější lamináty. Méně reaktivní typy pryskyřic jsou vhodné pro odlévání, protože průběh vytvrzování se u nich dá lépe kontrolovat a výrobky nepraskají jako u reaktivnějších pryskyřic. Pro svou pružnost se také hodí k povrchovým úpravám laminátu.

Tepelně odolné pryskyřice – Běžné typy pryskyřic jsou tepelně málo odolné, kvůli tomu je laminátování omezeno na teplotu do 100°C. Proto se speciální používají pryskyřice s větší tepelnou odolností

Pryskyřice stabilizované proti UV paprskům – Obsahují malé procento látek absorbujících UV paprsky stejné délky jako polyestery. Tyto látky chrání lamináty vystavené slunečnímu záření před žhnoutím a poklesem mechanických vlastností.

Nehořlavé pryskyřice – Nevýhodou polyesterových laminátů je jejich hořlavost. Proto se některé výrobky zhotovují z tepelně velmi odolných pryskyřic, které se těžko přeměňují v plyny. Samozhášitelné pryskyřice obsahují chlór nebo jiné látky, které potlačují reakce probíhající během hoření, takže laminát po oddálení od zdroje hoření zhasne[5].

2.3.2 Skleněné výztuže

Jsou nosným prvkem polyesterové pryskyřice ve skelném laminátu. Skelné výztuže mohou být –pramence, skleněné tkaniny, skleněné rohože a jiné. Vlastnosti a kvalita skleněných výztuží výrazně ovlivňují vlastnosti a kvalitu skelných laminátů.

Skelné tkaniny - Vyrábějí se tavením sklářského kmene, což je směs křemenného písku (cca 70%), vápence, potaše a collemanitu. Využívá se pouze některých typů sklářského písku, který odpovídá svými vlastnostmi (většinou typ E). Směs se taví přibližně při 1400°C a z taveniny se přímo vytahují elementární vlákna – tavenina vytéká dnem pece z platino-iridiové slitiny malými otvory o \varnothing 1-2 mm. Průměr vláken je 5-25 μ v závislosti na rychlosti odtahu. Hned

pod pecí se vlákna dále opracovávají, mažou se lubrikační složkou, aby se usnadnilo další zpracování a především, aby byla chráněna před mechanickým poškozením. Dále se přidávají ještě apretační složky, které zvyšují spojovací vlastnosti vláken. Následně se vlákna motají do pramenů a navíjejí se na cívky pro další použití. Dále se využívá technologie roving pro výrobu tkanin. Ty se vyrábějí v několika různých provedeních, kdy každé z nich má malinko odlišné vlastnosti a hodí se každý pro jiný účel použití. Především se jedná o provedení plátnové, keprové a atlasové[6].

- Plátnová vazba – vazné body se střídají tak, že tvoří souvislé diagonály ve dvou směrech. Je nejjednodušší, nejhustší a také nejpevnější.

- Keprová vazba – vazné body se střídají tak, že tvoří souvislé diagonály v jednom směru, zcela oddělené od sousedních. Tvoří svými vlastnostmi přechodný typ mezi plátnem a atlasovou vazbou.
- Atlasová vazba – vazné body jsou navzájem zcela izolovány. Je nejméně pevná, ale nejpoddanější. Vazné body jsou obvykle téměř zakryty a povrch tkaniny je vlastně vytvořen jen osnovní nebo útkovou nití.



Obrázek 15 – Provedení skelných tkanin

Jednotkou, která určuje jemnost tkaniny je gramáž, ta je většinou v rozmezí 250 – 1500 g/m². Tato hodnota vyjadřuje hmotnost vlákna v gramech v délce 1km.



Obrázek 16 – Skelná tkanina

Biaxiální skelné tkaniny- Jedná se o skelnou tkaninu, kterou tvoří dvě vrstvy jednosměrně uložených vláken. Jedna vrstva je uložena podélně v osnově tkaniny a druhá vrstva příčně do 90° v útku tkaniny. Obě vrstvy jsou prošity společně polyesterovým vláknem. Tkanina je vhodná pro složitější tvary a díly které musí být při namáhání velmi pružné. Další výhodou je, že se jednotlivé pramence nemůžou vzájemně o sebe rozřezat, jako je tomu možné u tkaných skelných tkanin.



Obrázek 17-Biaxiální skelná tkanina

Skelné rohože - Skelné rohože na rozdíl od skelných tkanin vznikají ukládáním nepravidelně orientovaných přibližně 50 mm dlouhých vláken, pojených emulzí nebo práškovým pojivem. Gramáž se pohybuje mezi 225 až 900 g/m². Emulzně pojené rohože jsou měkčí, lépe se tvarují, používají se pro tvarově složitější dílce. Práškově pojené rohože jsou tužší, používají se na jednodušší velkoplošné dílce nebo ve spojení se speciálními pryskyřicemi na vodě nebo chemicky odolné výrobky. Obecně lze tedy říci, že rohože se hodí spíše na výrobky, kde není kladen maximální důraz na pevnost, ale především na přesnost. Lépe se s nimi zpracovávají složité tvary. Samozřejmě pevnost je také velká, ale oproti svázanosti u tkanin je nepatrně nižší [6].



Obrázek 18 – Skelná rohož

2.3.3 Iniciátory a urychlovače

Nenasycené polyesterové pryskyřice se vytvrzují za studena – použitím iniciátoru (který umožňuje polymerační reakce) a urychlovače (jímž lze průběh reakce kontrolovaně urych-

lit. Na pořadí přidávání složek do směsi nezáleží, mísí se ale dbát na to, aby nedošlo k vzájemnému smíchání složek ještě před přidáním do směsi[5].

2.4 Technologie laminátování

U polyesterových skelných laminátů se využívá velké množství forem. Tento široký výběr je umožněn velkým počtem používaných technologií, protože polyesterové lamináty lze zpracovat i na těch nejjednodušších formách. Při výrobě laminátu rozeznáváme 2 základní pracovní technologie:

- Za studena –bez tlaku nebo s tlakem
- Za tepla – za tlaku

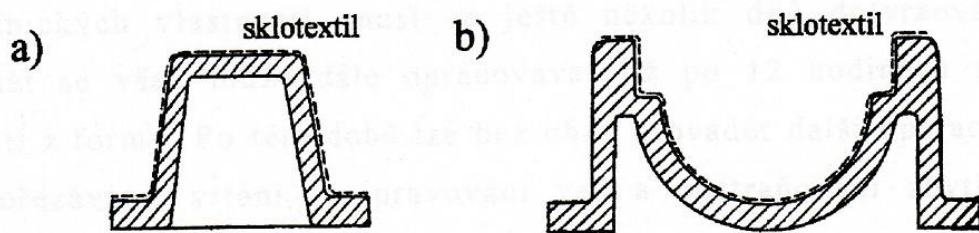
Při laminátování za studena by teplota neměla být vyšší než 25°C. Vytvrzování probíhá bez tlaku a za přístupu vzduchu. Zpracování za tepla je charakterizováno tím, že formy, v nichž se materiál lisuje a tvrdí, jsou vyhřívány na teplotu okolo 100°C.

Při lisování stačí takový tlak, aby obě plochy předmětu byly rovné a hladké a aby materiál neměl vzduchové bubliny ani na povrchu, ani uvnitř. Vyšším lisovacím tlakem se můžou skelná vlákna snadno porušit. Hlavně u tkanin může dojít k jejich rozdrčení v místě, kde jsou překládány[5].

Pro lamináty je charakteristickým technologickým procesem vrstvení bez tlaku a za normálních teplot. Z hlediska hospodárnosti s rychlosti provedení se nejlépe uplatňují formy dřevěné, sádrové a formy z plastických hmot nebo plechu. Používané formy můžeme rozdělit na pozitivní a negativní, přičemž každá z uvedených může být v provedení jednodílném nebo dvojdílném.

Jednodílnou pozitivní formou je forma, která představuje model budoucího výrobku, zmenšenou o tloušťku stěny hotového výrobku. Vrstvy skelné tkaniny se nakládají na její hladkou část. Vnitřní plocha výrobku bude hladká a vnější viditelná plocha bude drsná a nerovná, což je nevýhodou pozitivní formy (obr.19a).

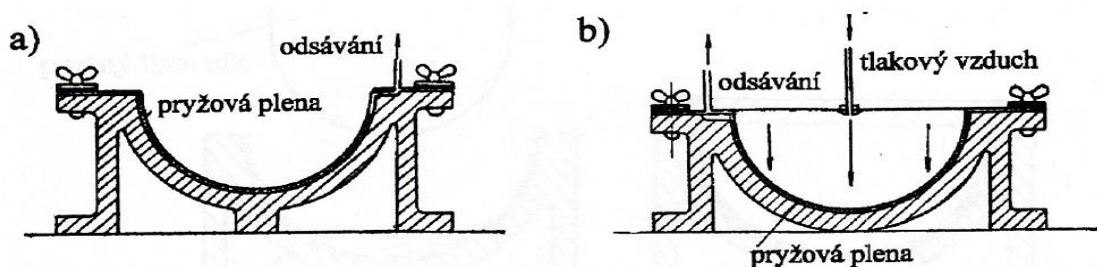
Jednodílná negativní forma je taková, u níž se vrstvení provádí do dutiny. Po vyjmutí výrobku z formy je jeho vnější povrch hladký a rovný, takže viditelná plocha je podhledové stránce plně vyhovující (obr. 19b).



Obrázek 19 – Jednodílná forma pro beztlakové tváření a) pozitivní, b) negativní

Tváření za studena lze provádět i za tlaku. Tlak ve hmotě se vyvozuje například tím, že se použije dvoudílné formy. Výroba dvoudílné formy je nákladná a trvá delší dobu. Proto se používá spíše jednodílných forem a tlak se vyvodí pryžovou membránou z plastické hmoty. Tlačnou sílu vyvine atmosférický tlak, umělý přetlak nebo kombinace obou (obr.20a).

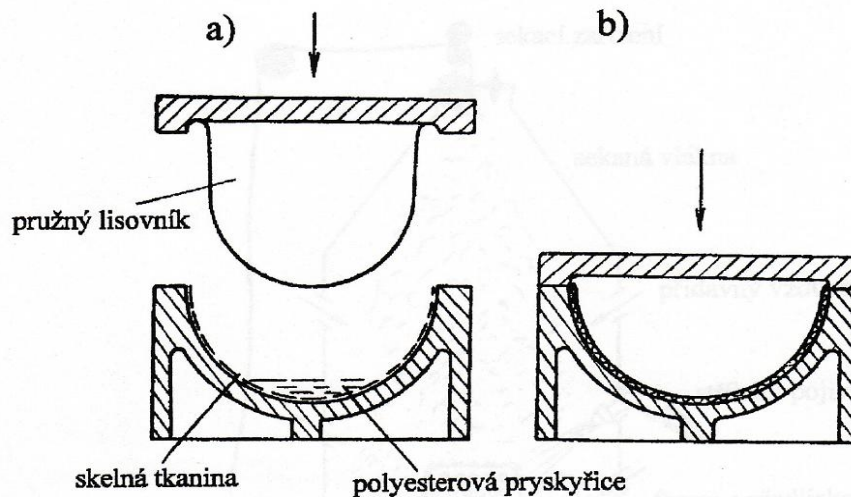
Zvláštním způsobem tvarování na jednodílné formě je kombinace podtlaku a přetlaku. Do tuhé jednodílné formy se vloží tkanina a na ni se nalije pryskyřice. Na tkaninu se položí pryžová membrána a forma se uzavře deskou. V nejvyšším místě se připojí odsávání a nad membránou se přivede vzduch pod tlakem za současného odsávání prostoru pod membránou (obr. 20b).



Obrázek 20 – Lisování pryžovou membránou a) vakuem, b) vakuem a přetlakem

Uváděné metody jsou vhodné pro tvarování velkých předmětů v malých sériích. Jsou pomalé a málo výkonné, proto se používá dvoudílné formy za současného tlaku a obvykle také za zvýšené teploty. Využívá se pružný lisovník. Jeden díl formy je nepohyblivý-lisovnice. Druhý díl lisovník je z pružné hmoty a upevňuje se na tuhé desce (obr.21a). Lisovník i lisovnice musí být opatřeny vhodným separátorem. Do lisovnice se vloží textil a nalije pryskyřice. Lisovník sjede do formy a svou pružností působí nejdříve na dno a pak

na stěny lisovnice (obr.21b). Jakmile začne působit tlak na všechny stěny, musí se forma nahoře uzavřít deskou, aby se pryskyřice mohla dokonale proimpregnovat. Forma zůstává uzavřena, dokud předmět není vytvrzen. Tohoto způsobu se dá využít při vytvrzování za tepla i při vytvrzování za studena[5].



Obrázek 21 – Lisování pružným lisovníkem a) otevřená forma, b) forma po uzavření

2.5 Uhlíkový laminát

Uhlíkový laminát, někdy nazývaný jako karbon, je kompozitní materiál, který se skládá z uhlíkových vláken, která tvoří uhlíkovou matici. Často bývá pokryt vrstvičkou karbidu křemíku, která chrání čistý uhlík před oxidací. Původně byl vyvinut pro hlavice mezikontinentálních balistických střel, ale známější je jako ochrana nosové části a náběžných hran křídel amerických raketoplánů. Uhlík-uhlíkový laminát je vhodný pro konstrukční užití ve vysokých teplotách, kde je potřeba tepelné odolnosti a nebo nízkého součinitele teplotní roztažnosti. Není tak křehký jak mnoho jiných keramik, postrádá však odolnost proti nárazu. Nachází velké využití pro díly karoserie Formulí nebo sportovních automobilů [6].



Obrázek 22 – Výrobek z uhlíkového laminátu

Uhlíková vlákna – Jsou technická vlákna s extrémně vysokou pevností a tuhostí, ale s nízkou tažností. Výchozí organické suroviny ve vláknitém tvaru jsou nejprve karbonizovány. Přitom se odštěpí téměř všechny prvky až na uhlík. Se stoupající teplotou, a tím se zvyšující grafítizací, zlepšují se mechanické vlastnosti. Při teplotě nad 1800°C je tvorba grafitové struktury ukončena, i když vzdálenost vrstev ve vláknech zůstává vždy větší než u vrstev v čistém grafitu.

Uhlíková vlákna se skládají z více než 90 % uhlíku, méně než 7% dusíku, méně než 1% kyslíku a méně než 0,3% vodíku. Mají průměr mezi 5 a 10 μm .

Uhlíková vlákna mají proti syntetickým vláknům progresivní deformační chování, tzn. Se zvyšujícím se zatížením stoupá hodnota E-modulu. Mají vysokou pevnost i hodnoty E-modulu až do teploty 500°C. Mají nízkou hustotu, mimořádně vysokou korozní odolnost, dobrou elektrickou a tepelnou vodivost.

Uhlíková vlákna jsou ve srovnání se skleněnými vlákny silně anizotropní. Cena uhlíkových tkanin a rohoží je více jak 10 krát větší, než cena skelných tkanin a rohoží.

Tabulka 1 – Porovnání elastických charakteristik různých druhů vláken

Vlákno	$E_{ }$ ($\text{kN} \cdot \text{mm}^{-2}$)	E_{\perp} ($\text{kN} \cdot \text{mm}^{-2}$)	$G_{ \perp}$ ($\text{kN} \cdot \text{mm}^{-2}$)	$\nu_{ \perp}$	$E_{ } : E_{\perp}$
E-sklo	73	73	30	0,25	1
Aramidové vysokomodulové (HM)	133	5,4	12	0,38	24,6
Uhlíkové standardní typ (HT)	240	15	10	0,28	16
Uhlíkové vysokomodulové (HM)	500	5,7	8	0,36	88

II. PRAKTICKÁ ČÁST

3 PŘÍPRAVA ZKUŠEBNÍCH TĚLES

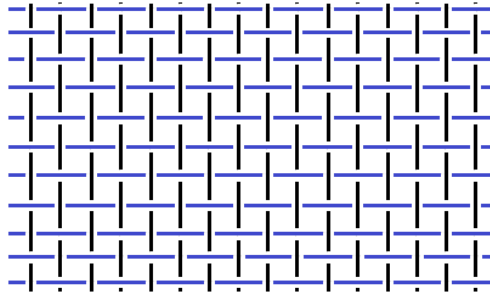
Vhodná zkušební tělesa pro metodu třibodového ohybu jsou popsána v následující tabulce [3].

Tabulka 2-vhodná zkušební tělesa pro třibodový ohyb

Materiál	délka tělesa (l)	Vzdálenost podpěr (L)	šířka (b)	tloušťka (h)
Třída I termoplasty vyztužené krátkými vlákny	80	64	10	4
Třída II plasty vyztužené rohožemi a tkaninami a smíšenými výztužemi (DMC,BMC,SMC a GMT)	80	64	15	4
Třída III příčné (90°) jednosměrné kompozity, jednosměrné (0°) a vícesměrné kompozity s $5 < E_{11}/G_{13} < \text{nebo} = 15$ (např. systémy se skelnými vlákny)	60	40	15	2
Třída IV jednosměrné (0°) a vícesměrné kompozity s $15 < E_{11}/G_{13} <$ nebo $= 50$ (např. systémy s uhlíkovými vlákny)	100	80	15	2
tolerance	0,+10	.+1	.+0,5	.+0,2
Poznámka: Pro snížení rozptylu hodnot u těles s hrubou výztuží je možno použít tělesa o šířce 25mm.				

Za materiál vzorků jsem zvolil skelný laminát pro jeho snadnou dostupnost a široké využití v praxi. Pryskyřici jsem použil na všechny vzorky stejnou - Polyesterovou pryskyřici s označením Lamit 109. Jedná se o univerzální typ polyesterové pryskyřice pro laminátování. Používá se ve spojení se dvěma procenty iniciátoru (polyester 100 hm.dílů/ iniciátor 2 hm. Díly). Pryskyřice obsahuje barevný indikátor tuhnutí, šedomodrá barva se po smíchání s iniciátorem mění na oranžovou a postupně až na světle narůžovělou při plném vytvrnutí. Druh použité tkaniny je odlišný. Použil jsem tři druhy skelných tkanin a rohoží:

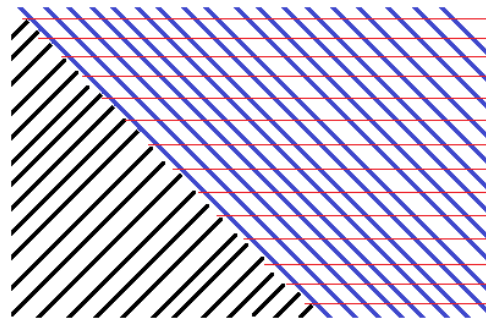
- *Skelná tkanina s pramenci tkanými kolmo na sebe* s hmotností 580 gramů na metr čtvereční. Vlákna jsou orientována kolmo na sebe a jsou vzájemně propleteny. Jednotlivé pramence z důvodu propletení nejsou přímé a tím je snížena pevnost tkaniny.



Obrázek 23- Schéma skelné tkaniny

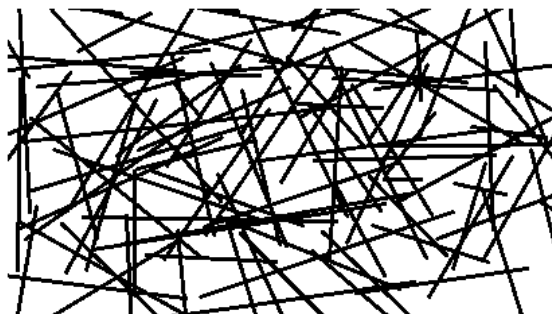
- *Biaxiální tkaninu* s 320 gramy na metr čtvereční. Pramence jsou vrstveny v řadě vedle sebe, kolmo na ně je vrstvena další řada pramenců. Jednotlivé řady jsou k sobě sešity. Vlákna jsou díky tomuto svázání ve zpřímeném tvaru a není tím snižována pevnost.

Na obrázku č.20 je znázorněna stavba tkaniny, spodní vrstva (černá), kolmo na ní 2. vrstva (modrá), vzájemně protkány nití (červená).



Obrázek 24- Schéma biaxiální skelné tkaniny

- *skelnou rohož z lisovaných vláken* s 300 gramy na metr čtvereční. Má nejnižší pevnost, kvůli nahodilému uspořádání vláken do různých směrů. Vlákna jsou lisována k sobě a vytvářejí rohož.



Obrázek 25- Schéma skelné rohože

Při skládání vrstev tkanin na sebe dosáhneme různých tloušťek požadovaných vzorků.

3.1 Výroba polotovaru ze skelného laminátu

Ze skelných rohoží a tkanin nastříháme pásy o rozměrech asi 10x400mm. Připravíme si rovnou podložku, na kterou budeme vrstvit materiál. Do nádoby ze skla, nebo z materiálu, který nerozleptá pryskyřice, namícháme směs polyesterové pryskyřice s iniciátorem v poměru 100:2 a pečlivě promícháme. Univerzálním štětcem nanese vrstvu směsi pryskyřice na podložku, na kterou položíme předem připravený plát skelné tkaniny nebo rohože. Tu dokonale prosytíme pryskyřicí pomocí štětce nebo válečku. Když jsou všechna vlákna tkaniny prosycena, pokládáme jednotlivé pláty tkaniny a proces opakujeme, dokud nedosáhneme požadované tloušťky materiálu. Necháme vyschnout a vyzrát bez dotlaku 24 hodin při teplotě okolo 20°C. Po vytvrzení polotovar sejmeme z podložky a můžeme dále opracovat.



Obrázek 26- Plát skelného laminátu ze skelné tkaniny



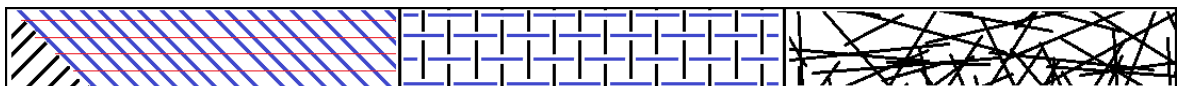
Obrázek 27 - Plát skelného laminátu z biaxiální tkaniny



Obrázek 28 - Plát skelného laminátu ze skelné rohože

3.2 Dělení materiálu-Řezání na zkušební tělesa

Zvolíme, jak u výsledného vzorku budou orientována vlákna. U skelné rohože jsou vlákna orientována nahodile, proto nezáleží, jakým směrem budeme vzorky řezat. U skelné tkaniny a biaxiální tkaniny dosáhneme nejvyšší pevnosti ve směru vláken. Proto u skelné tkaninu nařezeme vzorky ve směru vláken. U biaxiální tkaniny z důvodu malé šířky pásu (polotovaru) budou vlákna orientována 45° ke směru řezání vzorku.



Obrázek 26- Orientace vláken zkušebních těles (biaxiální tkanina, tkanina, rohož)

Připravený polotovar orýsujeme. Šířka b u všech vzorků bude 20mm, délka je závislá na tloušťce. Podle vzorce $l=20 \cdot h$, kde l je délka materiálu a h je tloušťka materiálu, vypočítáme délku.



Obrázek 30 – Schéma zkušebního tělesa

Při rýsování musíme k rozměrům připočítat tloušťku řezného kotouče. Přímočarou Pilou (flexa) s řezným kotoučem na ocel o průměru 120mm nařezeme vzorky na požadované velikosti. Z každého plátu (potovou) vyřezeme 10kusů vzorku, některé pláty jsou malé, tudíž vyjde vzorků méně. Zkontrolujeme, zda nejsou na vzorku trhliny, nebo bubliny, což by mělo nepříznivý vliv na zkoušku a zkreslilo by výsledky. Tyto vadné vzorky vyhodíme a dořežeme náhradní vzorky



Obrázek 31 – Nařezané zkušební tělesa laminátu ze skelné rohože



Obrázek 32 – Nařezané zkušební tělesa laminátu ze skelné tkaniny

3.3 Měření rozměrů zkušebních těles

Pro přesné měření použijeme velmi rozšířené posuvné měřítko (posuvku), které má posuvné čelisti. Zkontrolujeme rozměry. Tloušťka jednotlivých vzorků je odlišná, protože pryskyřice je nerovnoměrně nanášena. Důležitým parametrem je počet vrstev, kde 1mm = 1vrstva skelné tkaniny. U skelné rohože byly vzorky dobroušeny brusným papírem o hrubosti P100 na požadované rozměry.

3.4 Dělení zkušebních těles do jednotlivých sérií

1. Série - Skelná tkanina s pramenci tkanými kolmo na sebe
(580g/m²) 80x20x4mm ...10kusů
2. Série - Skelná rohož
(300g/m²) 80x20x4mm...8kusů
3. Série - Skelná tkanina biaxiální
(320g/m²) 80x20x4mm...10kusů
4. Série - Skelná tkanina biaxiální
(320g/m²) 60x20x3mm...10kusů
5. Série - Skelná tkanina s pramenci tkanými kolmo na sebe
(580g/m²) 100x20x5...10kusů
6. Série - Skelná rohož
(300g/m²) 100x20x5mm...9kusů
7. Série - Skelná rohož
(300g/m²) 120x20x6mm...6kusů
8. Série - Skelná tkanina s pramenci tkanými kolmo na sebe
(580g/m²) 120x20x6mm...10kusů

4 PROVEDENÍ MECHANICKÉ ZKOUŠKY

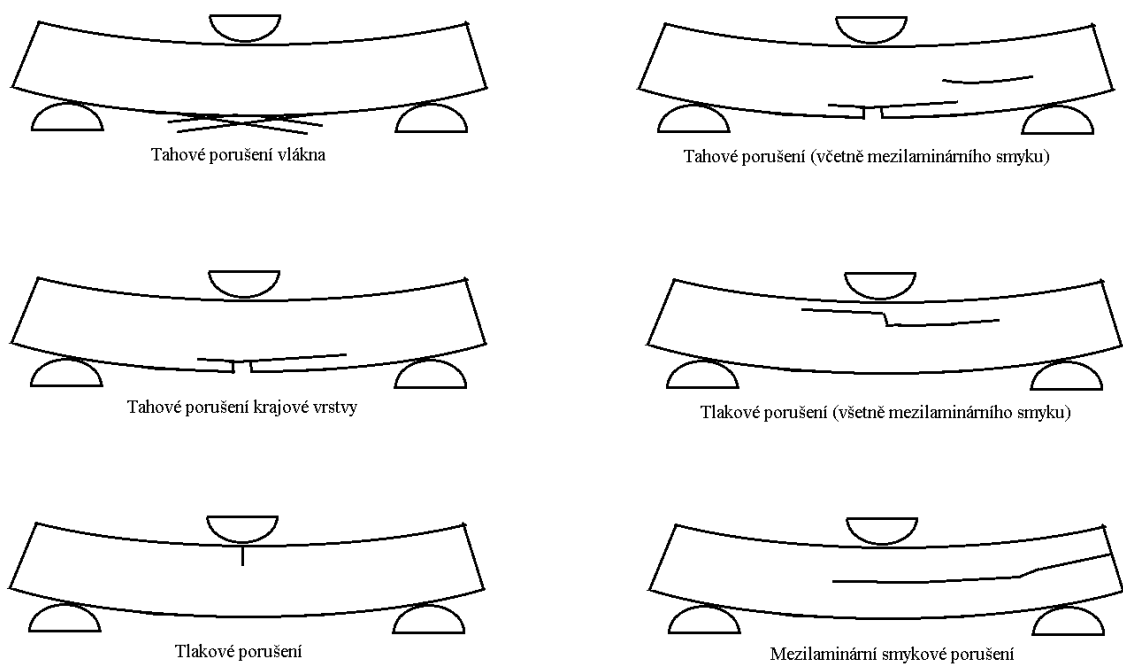
Nejdůležitějším parametrem spoilerů a ostatních výrobků z laminátu je tuhost a pevnost v ohybu. Proto připravené zkušební tělesa byly odzkoušeny ohybovou zkouškou na pevnost v ohybu ve školní laboratoři.

4.1 Zkouška ohybem

Zkouška ohybem byla provedena dle normy ČSN EN ISO 14125 . Tato norma vychází z ISO 178 a je určena pro vlákny vyztužené plastové kompozity. Zahrnuje rovněž zkušební podmínky používané při zkoušení sklem vyztužených plastů. Zkušební podmínky jsou proti ISO 178 rozšířeny a předepisují ohybové zatěžování třibodové a čtyřbodové. Popisují rovněž podmínky pro pojiva používaná v kompozitech obsahující nové typy vláken jako jsou uhlíková a aramidová. Používají se zkušební tělesa, která mohou být připravena v požadovaných rozměrech, obrobena ze střední části standardního víceúčelového zkušebního tělesa nebo obrobena z polotovarů, výlisků nebo laminátů. Metoda předepisuje nejvhodnější rozměry tělesa. Zkoušky prováděné na tělesech jiných rozměrů nebo na tělesech připravených za jiných podmínek mohou poskytnout nesrovnatelné výsledky. Výsledky mohou být ovlivněny zkušební rychlostí a kondicionováním těles. U materiálů, jejichž průřez není homogenní, nebo které leží mimo oblast lineárně-elastické odezvy, se výsledek vztahuje jenom na zkoušenou tloušťku a strukturu. Jsou-li požadována data pro srovnávací účely, musí být tyto faktory pečlivě ověřeny a zaznamenány.

Podstata zkoušky- Zkušební těleso ve tvaru hranolu umístěné ve zkušebním přípravku je ohýbáno při konstantní rychlosti dokud nedojde k porušení tělesa nebo dokud deformace nedosáhne předem stanovené hodnoty. Během zkoušky se měří síla působící na těleso a průhyb.

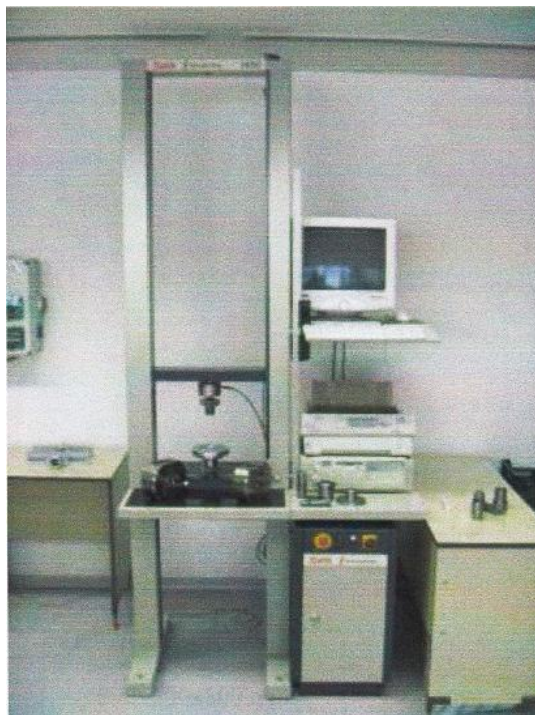
Metoda se používá k hodnocení ohybových vlastností a stanovení pevnosti v ohybu, ohybového modulu a jiných parametrů, vyplývajících ze vztahu ohybové napětí/deformace za předepsaných podmínek. Používá volně podepřený hranol, zatěžovaný třibodovým ohybem. Geometrie zkoušky se volí tak, aby byla omezena smyková deformace a vyloučeno porušení v důsledku mezilaminárního smyku [3].



Obrázek 33- Příklady možných typů porušení

4.2 Zkušební stroj ZWICK 1456

Pro zkoušku ohybem byl použit univerzální zkušební stroj ZWICK 1456 (obr.34). Na tomto stroji je možné provádět zkoušky tahem, tlakem, ohybem i cyklické zkoušky míjivým zatížením.

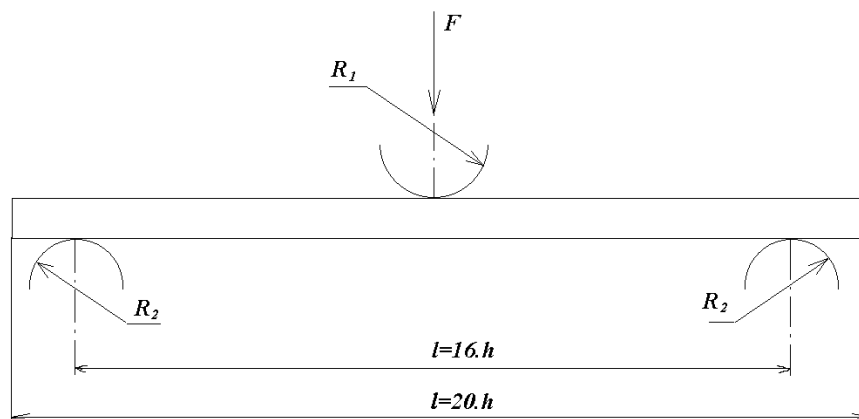


Obrázek 34- Univerzální zkušební stroj Zwick 1456

Tabulka 3.- Technické specifikace stroje Zwick 1456

Maximální zkušební síla	20 kN
Strojová výška	1284 mm
Celková výška	2012 mm
Celková šířka	630 mm
Šířka pracovního prostoru	420 mm
Hmotnost	150 kg

Do zkušebního stroje nasadíme podpěry pro zkoušku ohybem. Vzdálenost spodních podpěr nastavíme tak, aby vzdálenost mezi nimi byla rovna 16-ti násobku tloušťky zkoušeného vzorku (obr.35).

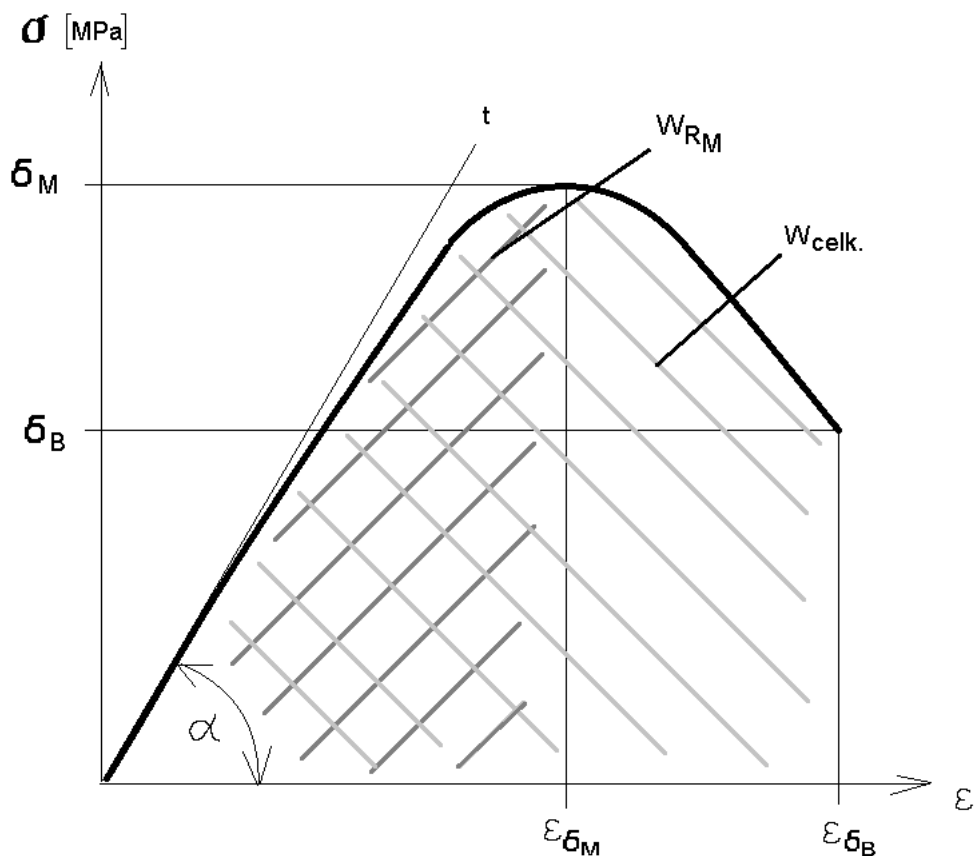


Obrázek 35-Uspořádání při tříbodovém zatěžování

V programu Zwick II v.3.3.1. nastavíme vzdálenost horní podpěry od spodních. Ta se rovná tloušťce vzorku +1-2mm. Nastavíme rychlost posuvu horní podpěry a hodnoty velikostí vzorku.

4.3 Měření

Spustíme zkoušku. Stroj nám v průběhu zkoušky kreslí pracovní diagram v závislosti ohybového napětí a deformaci (obr.36). V počátku napětí narůstá úměrně s deformací, které je v diagramu znázorněno tečnou t . Ta je pod úhlem α . Tangenta úhlu α je rovno E . S narůstající deformací přestane být napětí úměrné a roste pomaleji až do té doby, kdy dosáhne svého maxima. Maximální napětí, které zkušební vzorek vydrží se nazývá Mez pevnosti σ_M a jednotkou je Megapascal. Na ose deformace je tento bod označen jako ε_{σ_M} . V tomto okamžiku zatěžující napětí klesá do doby, až dojde k přelomení zkušebního tělesa. V tomto místě končí zkouška a tento bod je označený jako σ_B , na ose deformace jako ε_{σ_B} . Zkoušku opakujeme u všech vzorků. Po každé sérii nastavíme vzdálenost spodních podpěr stroje podle délky vzorku a nastavíme výšku horní podpěry. Po ukončení měření uložíme získané hodnoty a zpracujeme do tabulek.



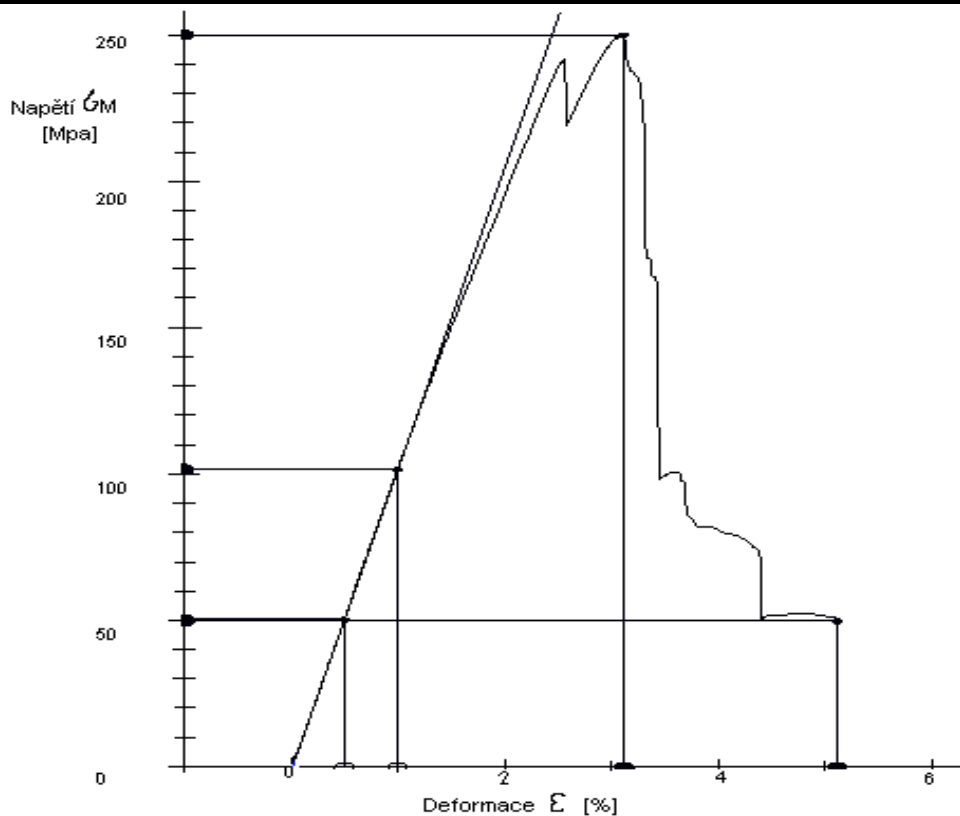
Obrázek 36 – Závislost zatěžujícího napětí na deformaci

4.4 Experimentálně naměřené hodnoty

Série 1. - Skelná tkanina s pramenci tkanými kolmo na sebe 80x20x4mm ...10kusů

Tabulka 4. – experimentálně zjištěné hodnoty série 1

	h	b	σ_M	$\varepsilon \sigma_M$	σ_B	$\varepsilon \sigma_B$	Δy_B	Δy_M	E
č.m.	mm	mm	MPa	%	MPa	%	mm	mm	MPa
1	3,9	21	190,83	3,25	38,17	5,93	10,38	5,68	7145,45
2	3,9	20,5	141,15	2,68	28,21	7,52	13,16	4,68	6716,93
3	3,9	20,5	226,12	3,32	72,43	4,65	8,14	5,8	6971,8
4	3,9	20	359,37	2,79	78,59	4,21	7,37	4,88	14171,21
5	3,9	20,4	295,4	3	158,9	3,62	6,33	5,25	10854,12
6	3,9	20,7	214,33	2,96	57,24	3,97	6,95	5,18	8237,3
7	3,9	20,2	249,97	3,12	49,79	5,12	8,97	5,46	10278,63
8	3,9	19,7	345,85	3,18	66,35	5,03	8,8	5,57	12582,37
9	3,9	20,1	270,01	2,45	54,04	8,92	15,62	4,28	12425,64
10	3,9	20,5	215,04	2,72	50,4	3,98	6,96	4,76	9064,45
x	3,9	20,36	250,81	2,95	65,41	5,29	9,27	5,16	9844,79
s	0	0,3718	68,33	0,28	36,14	1,72	3	0,49	2637,27
v	0	1,83	27,24	9,56	55,25	32,42	32,42	9,56	26,79

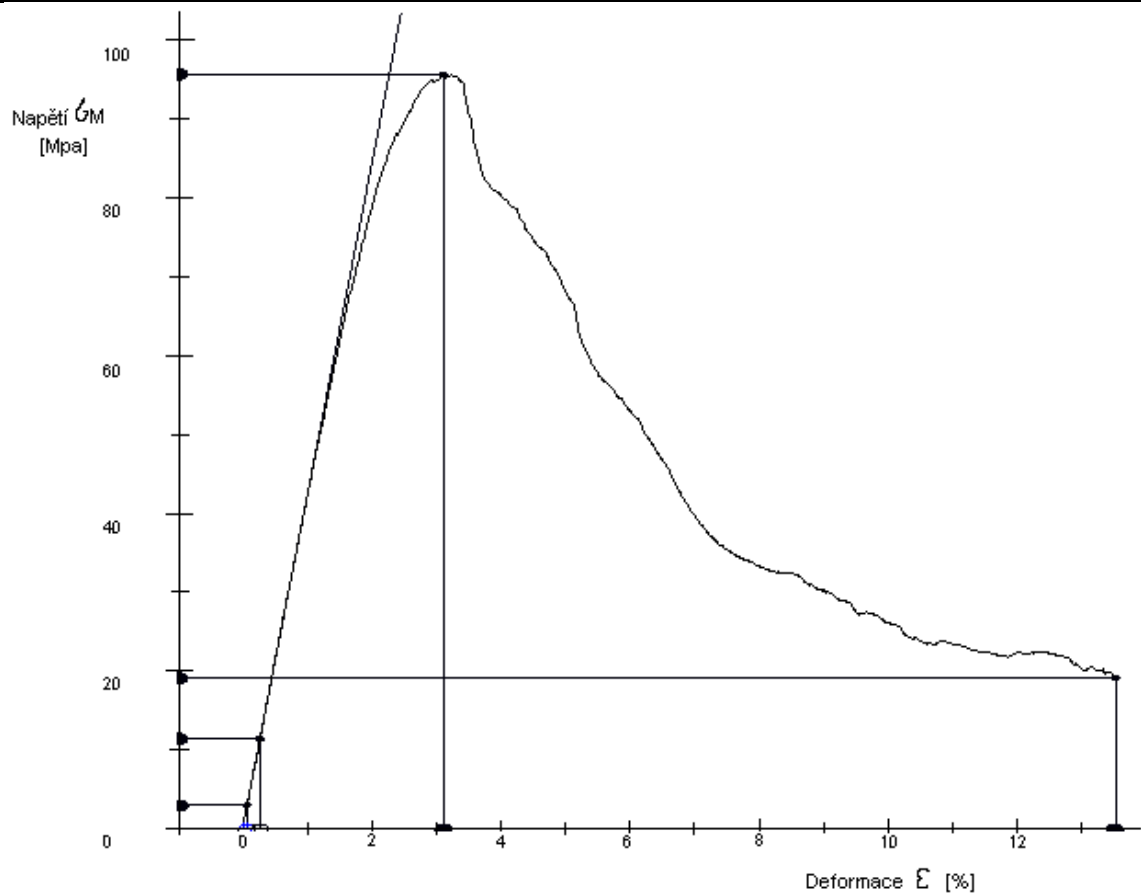


Graf 1- závislost napětí na deformaci tělesa č.7 v první sérii

Série 2. – Skelná rohož 80x20x4mm...8kusů

Tabulka 5. –experimentálně zjištěné hodnoty série 2

č.m.	h mm	b mm	σ_M Mpa	$\varepsilon \sigma_M$ %	σ_B Mpa	$\varepsilon \sigma_B$ %	Δy_B mm	Δy_M mm	E Mpa
1	4,4	20,6	75,41	3,39	15,07	5,2	8,06	5,27	2654,19
2	4,4	20,8	79,28	2,16	15,85	3,21	4,98	3,36	4157,08
3	3,5	20,7	70,88	3,94	14,16	8,68	16,94	7,68	2067,09
4	3,5	20,7	154,7	2,67	67,07	3,31	6,46	5,21	6456,51
5	4,6	20,1	87,98	3	17,59	4,24	6,29	4,45	3881,45
6	3,8	20	88,05	2,89	17,59	5,86	10,52	5,19	3821,38
7	3,8	20,9	140,84	3,67	28,16	4,77	8,57	6,6	4396,32
8	3,5	19,7	95,81	3,11	19,16	13,53	26,39	6,06	4214,51
x	3,938	20,44	99,12	3,1	24,33	6,1	11,03	5,48	3956,07
s	0,4596	0,4406	31,26	0,56	17,81	3,47	7,23	1,32	1300,55
v	11,67	2,16	31,54	18,18	73,18	56,83	65,56	24,09	32,87

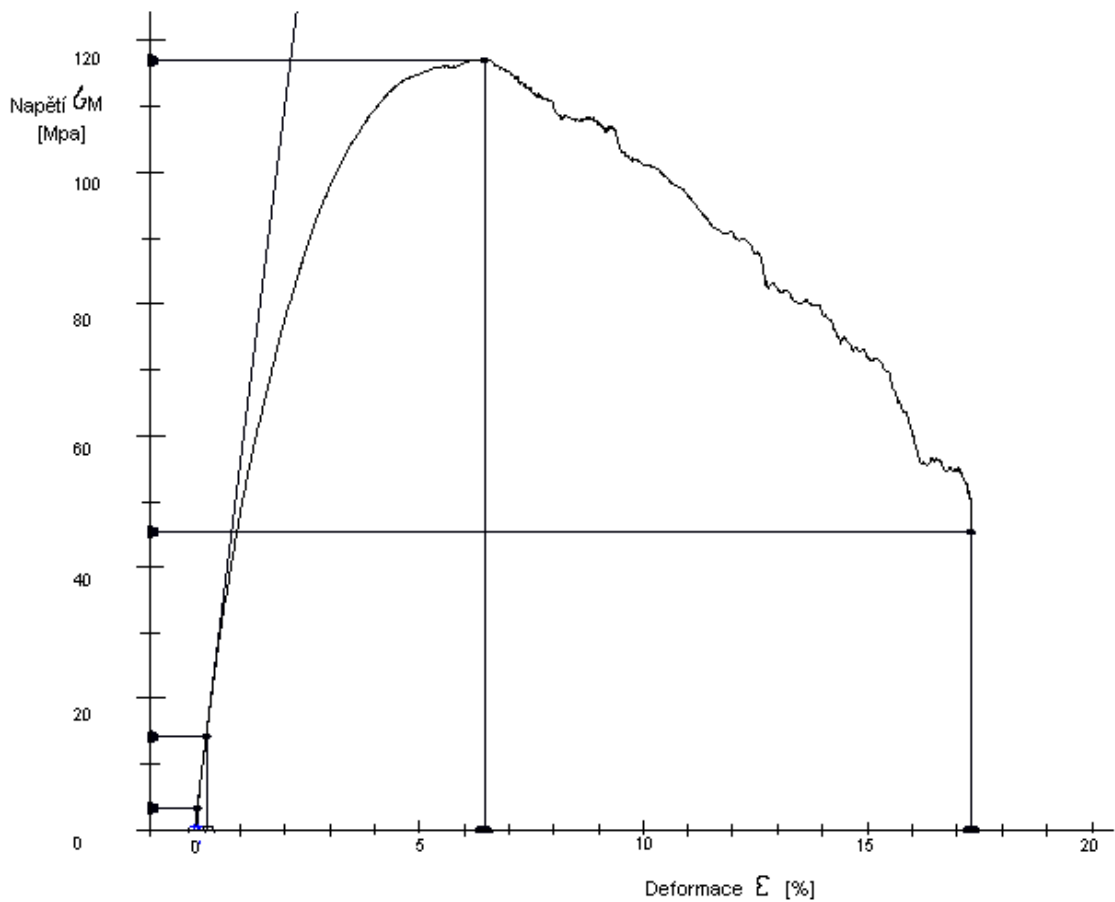


Graf 2- závislost napětí na deformaci tělesa č.8 v druhé sérii

Série3. - Skelná tkanina biaxiální 80x20x4mm...10kusů

Tabulka 6. –experimentálně zjištěné hodnoty série 3

č.m.	h mm	b mm	σ_M MPa	$\epsilon \sigma_M$ %	σ_B MPa	$\epsilon \sigma_B$ %	Δy_B mm	Δy_M mm	E MPa
1	3,9	19,8	100,1	5,77	28,23	18,13	31,74	10,1	4621,41
2	3,8	20,8	117,09	6,46	45,42	17,31	31,1	11,61	5434,65
3	3,5	20,7	120,99	5,99	46,04	16,81	32,79	11,68	5511,42
4	3,5	20,5	102,08	6,19	36,98	17,64	34,4	12,08	4934,29
5	3,5	20,5	146,77	5,99	46,95	16,85	32,86	11,68	6750,72
6	3,9	20,4	111,93	6,06	34,64	19,39	33,94	10,6	5360,25
7	3,5	19,9	113,39	5,59	22,35	17,6	34,33	10,91	5864,51
8	3,7	20,4	136,25	6,14	46,68	18,21	33,59	11,32	6500,48
9	4	19,8	109,13	7,27	43,72	17,97	30,66	12,4	4697,5
10	3,6	20,2	131,07	6,01	26,08	19,33	36,66	11,4	6014,33
x	3,69	20,3	118,88	6,15	37,71	17,92	33,21	11,38	5568,96
s	0,1969	0,3621	15,07	0,46	9,44	0,9	1,78	0,69	720,73
v	5,34	1,78	12,68	7,45	25,03	5	5,37	6,04	12,94

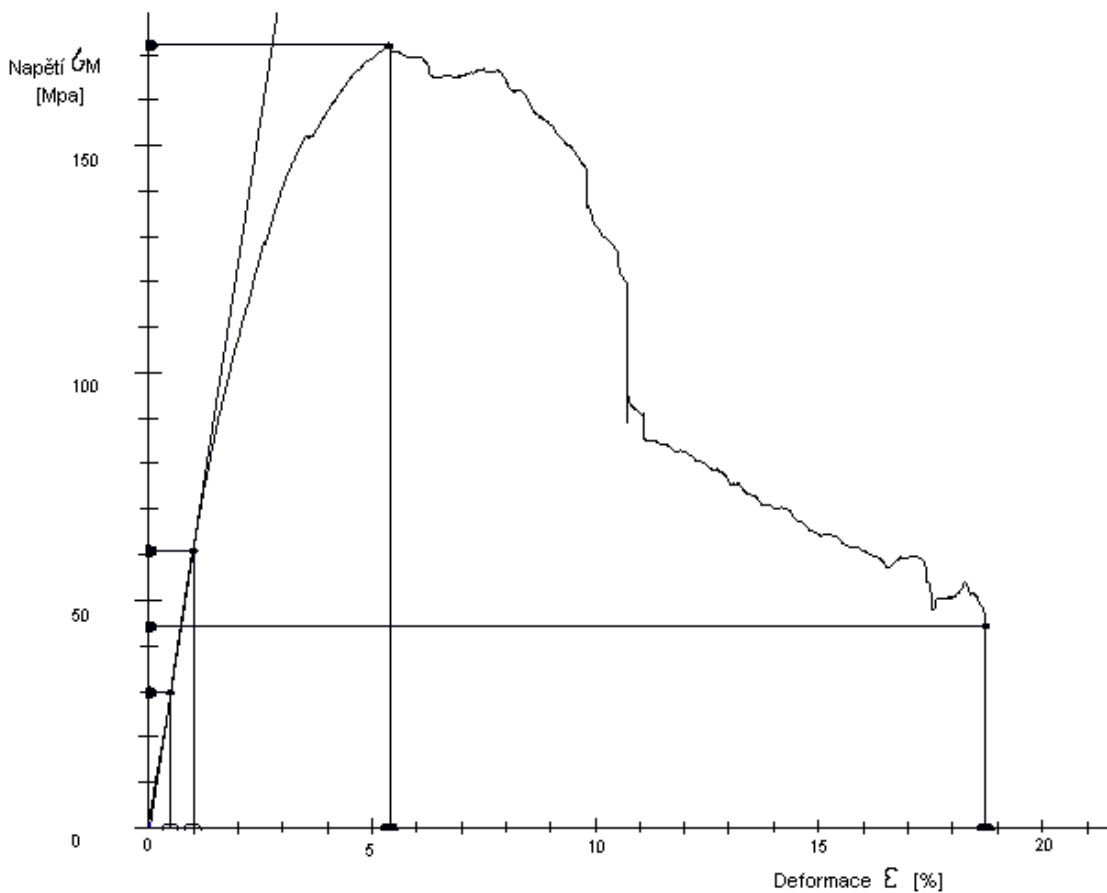


Graf 3- závislost napětí na deformaci tělesa č.2 ve třetí sérii

Série4. - Skelná tkanina biaxiální 60x20x3mm...10kusů

Tabulka 7. –experimentálně zjištěné hodnoty série 4

č.m.	h mm	b mm	σ_M MPa	$\epsilon \sigma_M$ %	σ_B MPa	$\epsilon \sigma_B$ %	Δy_B mm	Δy_M mm	E MPa
1	3	20,4	167,45	5,65	32,8	21,24	27,18	7,23	4751,73
2	3	20,2	150,55	5,69	30,1	19,35	24,77	7,29	4972,6
3	2,7	20	206,94	6,21	41,37	16,79	23,89	8,83	6753,55
4	2,5	20,1	212,86	4,86	51,06	17,87	27,44	7,46	7187,63
5	2,8	20,5	172,05	5,4	44,38	18,73	25,69	7,4	6237,58
6	2,8	20,5	185,48	5,56	36,84	18,11	24,84	7,62	6069,74
7	2,6	20,3	178,25	4,15	48,14	18,11	26,75	6,12	6484,05
8	2,6	20,1	190,85	5,22	12,93	23,2	34,26	7,71	6439,08
9	2,9	20,7	108,57	4,66	9,75	27,11	35,9	6,17	4220,79
10	2,7	20	177,01	4,57	41,01	15,33	21,8	6,5	6534,84
x	2,76	20,28	175	5,2	34,84	19,59	27,25	7,23	5965,16
s	0,1713	0,2394	29,64	0,63	13,95	3,44	4,47	0,81	972,96
v	6,21	1,18	16,94	12,07	40,05	17,56	16,39	11,19	16,31

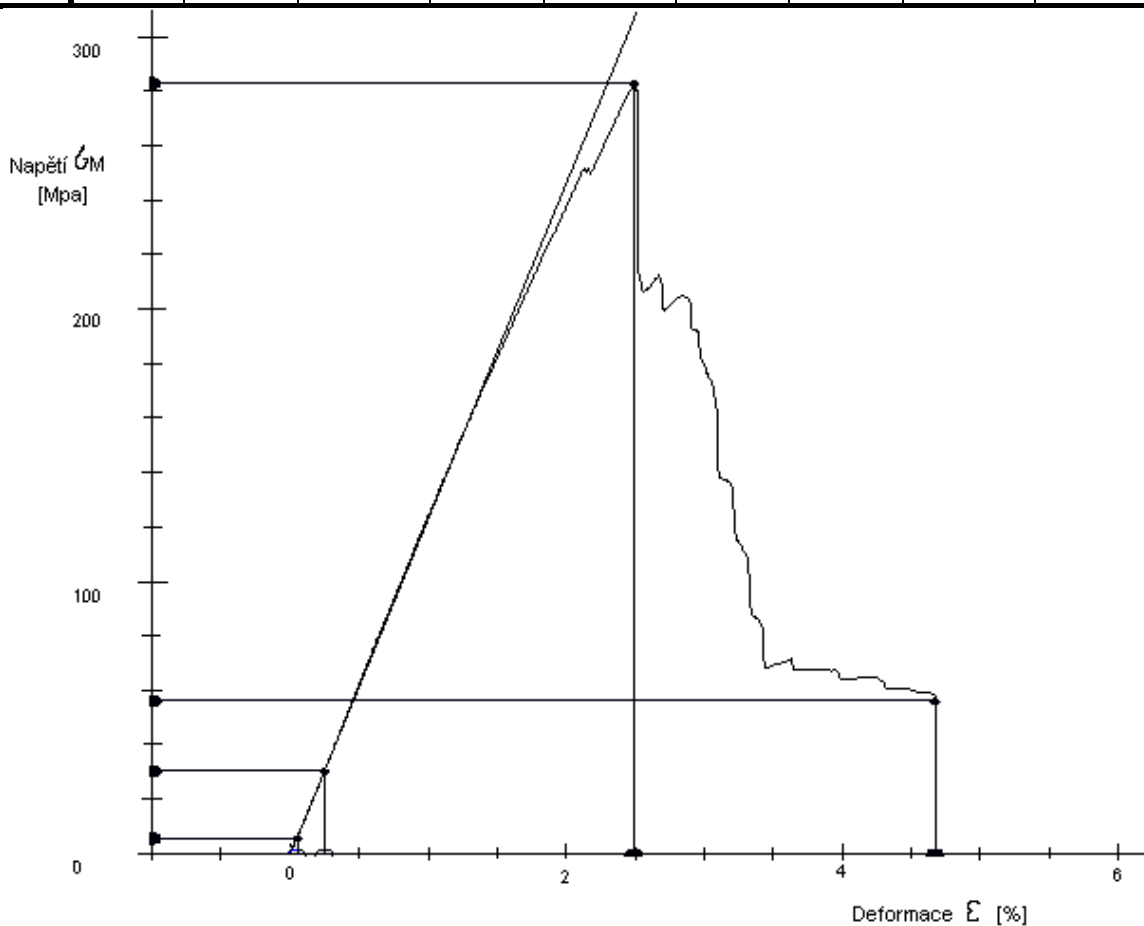


Graf 4- závislost napětí na deformaci tělesa č.5 ve čtvrté sérii

Série5. - Skelná tkanina s pramenci tkanými kolmo na sebe 100x20x5...10kusů

Tabulka 8. –experimentálně zjištěné hodnoty série 5

č.m.	h mm	b mm	σ_M MPa	$\epsilon \sigma_M$ %	σ_B MPa	$\epsilon \sigma_B$ %	Δy_B mm	Δy_M mm	E MPa
1	4,8	20,4	334,68	3,15	141	4,17	9,28	7	11671,57
2	5,1	19,4	178,72	3,28	80,47	5,42	11,33	6,85	8659,84
3	4,6	20	330,62	3,12	66,07	5,15	11,93	7,24	11544,1
4	4,7	20,2	297,65	2,63	91,37	4,27	9,69	5,97	12158,38
5	5	19,8	236,65	2,84	47,32	5,63	12,01	6,06	8659,28
6	4,6	19,9	289,66	2,9	57,81	5,93	13,75	6,73	11915,45
7	4,8	20,3	296,88	3,04	93,94	4,52	10,06	6,76	11071,56
8	4,8	19,7	282,81	2,88	56,35	5,04	11,19	6,41	11315,3
9	4,8	19,7	283,12	2,5	56,14	4,67	10,39	5,55	12332,99
10	5,1	20	326,54	3,06	172,71	3,96	8,28	6,41	12504,25
x	4,83	19,94	285,73	2,94	86,32	4,88	10,79	6,5	11183,27
s	0,1829	0,3062	47,42	0,24	40,99	0,66	1,58	0,52	1402
v	3,79	1,54	16,59	8,18	47,49	13,57	14,66	8	12,54

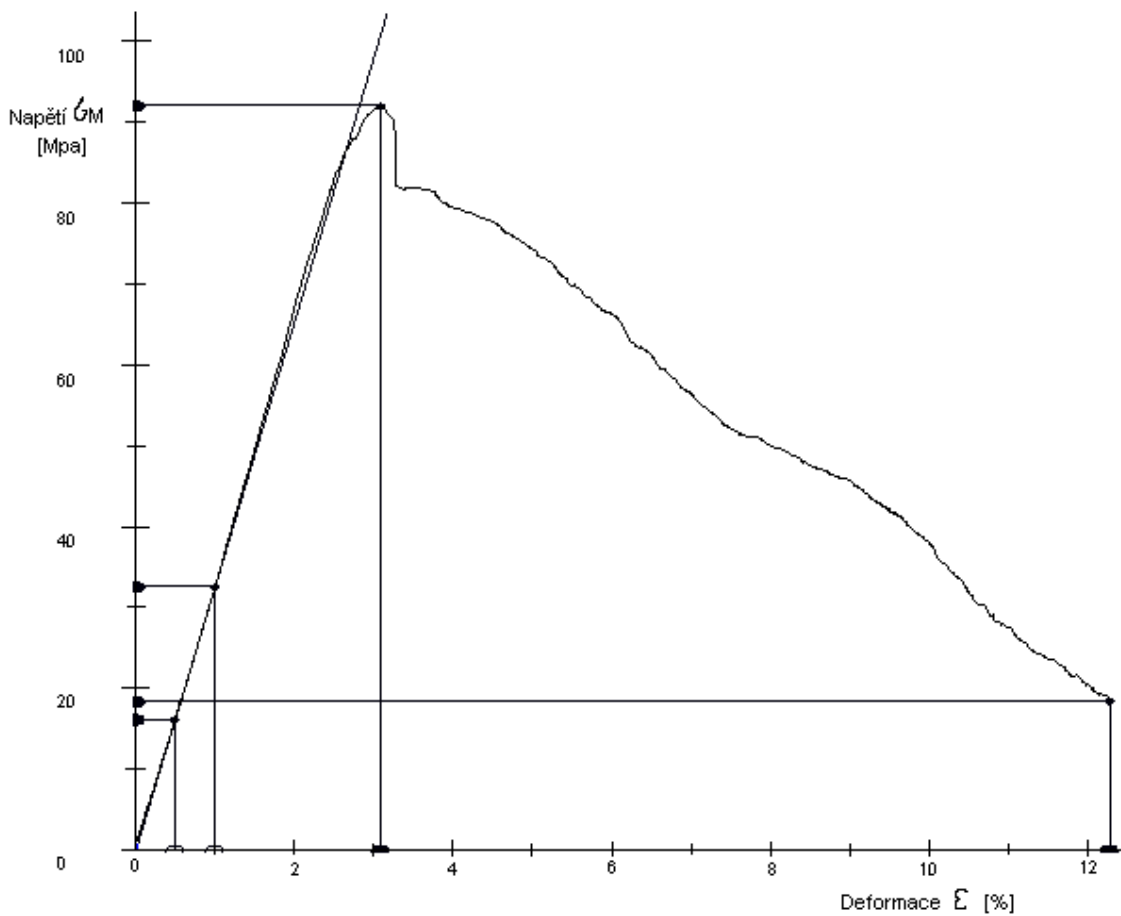


Graf 5- závislost napětí na deformaci tělesa č.9 v páté sérii

Série6. - Skelná rohož 100x20x5mm...9kusů

Tabulka 9. –experimentálně zjištěné hodnoty série 6

č.m.	h mm	b mm	σ_M MPa	$\epsilon \sigma_M$ %	σ_B MPa	$\epsilon \sigma_B$ %	Δy_B mm	Δy_M mm	E MPa
1	5,5	21	98,16	3,71	19,63	4,47	8,66	7,2	2817,73
2	5,2	20,8	61,88	4,73	12,37	9,46	19,4	9,7	1764,07
3	4,5	20	76,61	3,69	15,32	7,39	17,52	8,75	2430,39
4	5,4	20,6	96,79	3,03	19,34	5,71	11,28	5,99	4072,54
5	4,8	20,7	71,37	4,48	14,27	9,86	21,9	9,96	2224,73
6	4,5	20,7	92,04	3,08	18,4	12,28	29,11	7,31	3270,86
7	5,3	20,5	79,35	3,87	15,85	7,07	14,24	7,79	2718,73
8	5,4	21,4	110,52	3,26	22,06	4,23	8,35	6,44	4221,34
9	5,4	19,7	108,29	2,85	21,64	4,4	8,7	5,62	4259,22
x	5,111	20,6	88,33	3,63	17,65	7,21	15,46	7,64	3086,62
s	0,4014	0,505	16,88	0,65	3,37	2,84	7,15	1,56	921,88
v	7,85	2,45	19,1	17,95	19,07	39,36	46,25	20,38	29,87

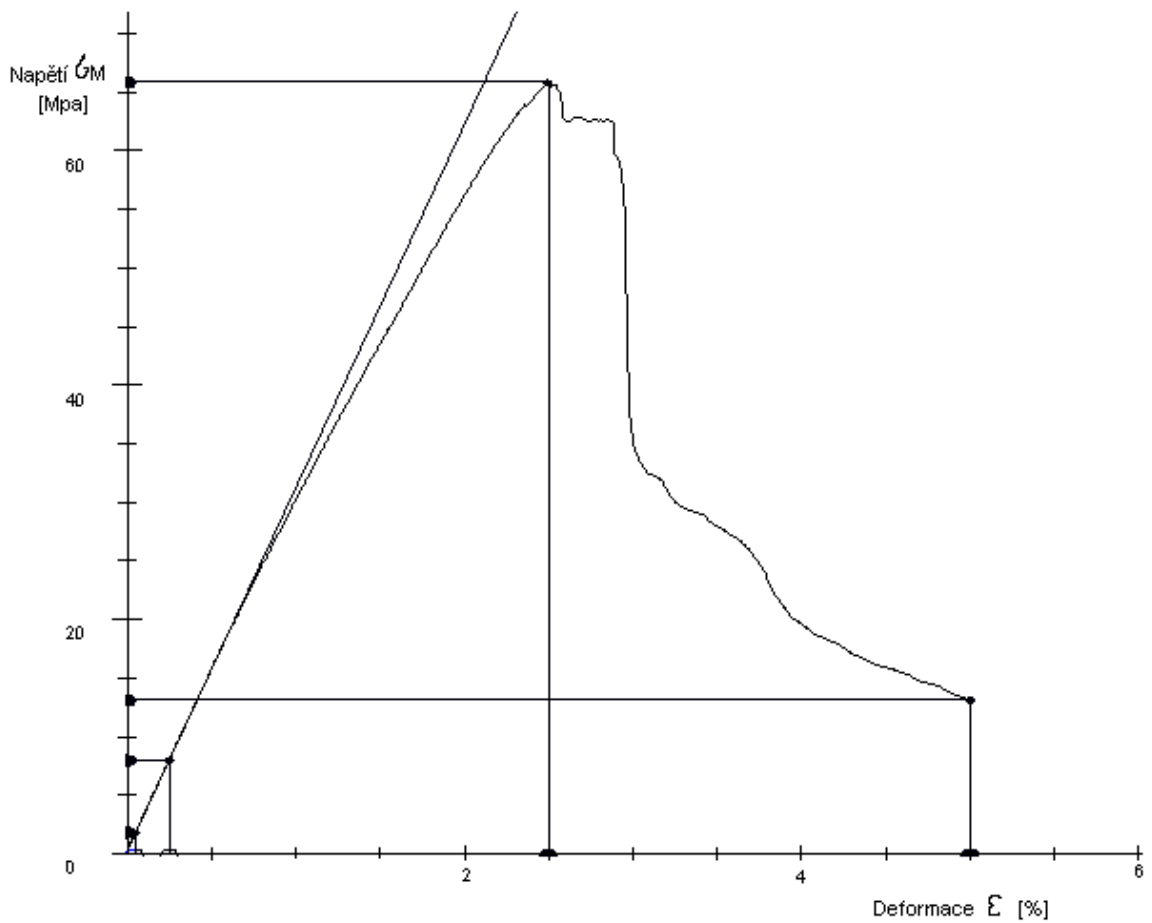


Graf 6- závislost napětí na deformaci tělesa č.6 v šesté sérii

Série 7. - Skelná rohož 120x20x6mm...6kusů

Tabulka 10. –experimentálně zjištěné hodnoty série 7

č.m.	h mm	b mm	σ_M MPa	$\varepsilon \sigma_M$ %	σ_B MPa	$\varepsilon \sigma_B$ %	Δy_B mm	Δy_M mm	E MPa
1	6,1	20,7	76,95	3,05	3,73	11,49	28,94	7,68	3067,85
2	6	20,9	65,89	2,5	13,17	5	12,81	6,4	3094,68
3	6,4	20,7	74,5	3,05	14,9	5,02	12,05	7,32	2617,13
4	6,1	20,4	62,05	3,03	12,35	9	22,65	7,64	2414,54
5	5,9	21,1	51,46	4,57	10,27	11,39	29,65	11,9	1827,94
6	6	21	76,5	3,8	15,29	5,95	15,23	9,74	2478,74
x	6,083	20,8	67,89	3,34	11,62	7,98	20,22	8,45	2583,48
s	0,1722	0,253	10,08	0,73	4,27	3,06	7,97	2,02	470,62
v	2,83	1,22	14,85	22,04	36,77	38,32	39,39	23,86	18,22

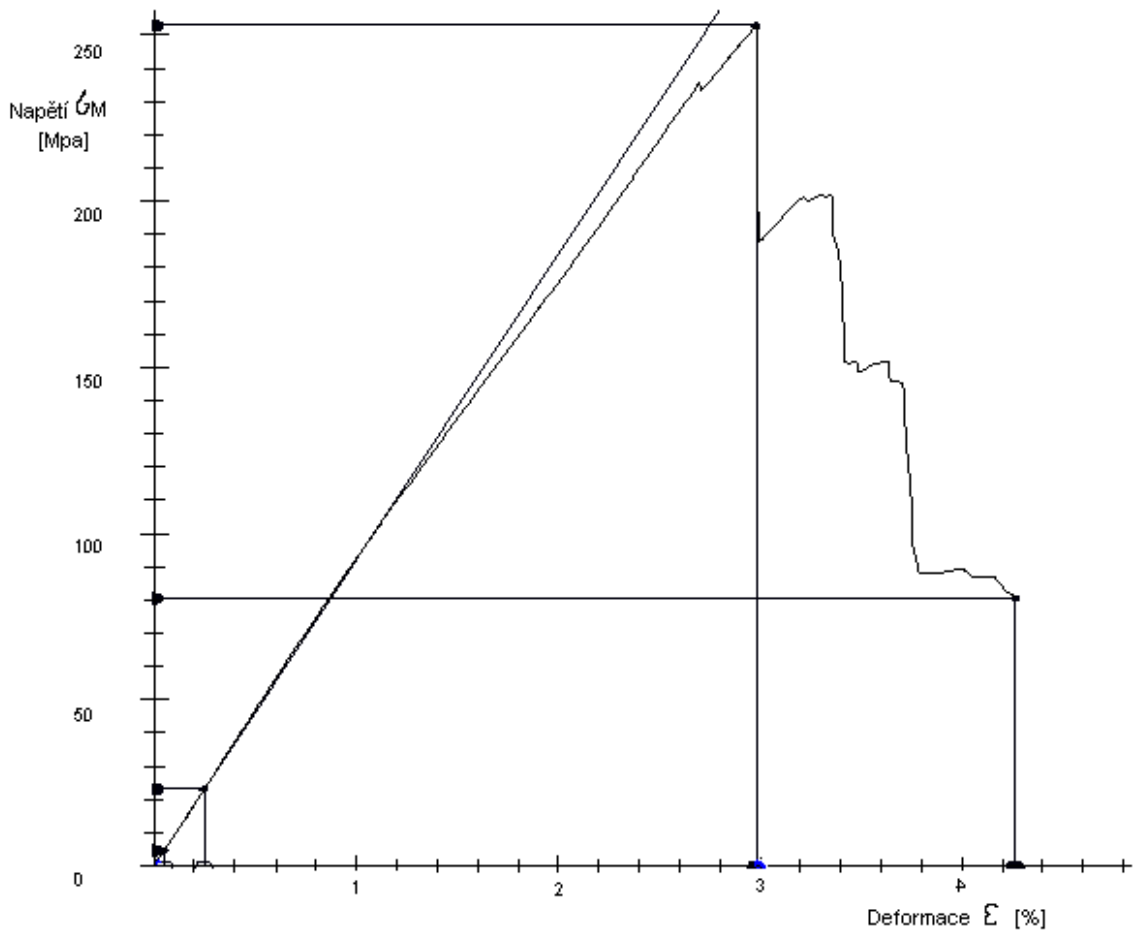


Graf 7- závislost napětí na deformaci tělesa č.2 v sedmé sérii

Série8. - Skelná tkanina s pramenci tkanými kolmo na sebe 120x20x6mm...10kusů

Tabulka 11. –experimentálně zjištěné hodnoty série 8

č.m.	h mm	b mm	σ_M MPa	$\epsilon \sigma_M$ %	σ_B MPa	$\epsilon \sigma_B$ %	Δy_B mm	Δy_M mm	E MPa
1	6	20,3	171,58	2,19	35,72	3,61	9,23	5,61	9316,42
2	6,1	20,5	164,15	2,68	32,8	3,64	9,17	6,76	7458,52
3	6,5	20,6	304,48	2,92	73,24	4,2	9,93	6,9	11925,98
4	6,2	20,8	335,95	3,14	150,37	3,92	9,7	7,77	11995,1
5	6,1	20	253,06	2,98	80,7	4,27	10,74	7,51	9195,22
6	6,1	21,4	309,75	2,98	61,94	4,81	12,11	7,51	11639,72
7	6,3	20,8	170,37	2,13	36,24	3,68	8,97	5,19	8985,16
8	6,2	19,5	202,96	2,32	40,58	3,36	8,33	5,75	10101,47
9	6	20,7	172,57	2,47	44,49	3,87	9,9	6,33	7699,71
10	6,3	20,4	292,98	2,69	73,21	3,89	9,47	6,56	11674,09
x	6,18	20,5	237,78	2,65	62,93	3,92	9,76	6,59	9999,14
s	0,1549	0,5099	68,61	0,36	35,55	0,41	1,05	0,88	1734,83
v	2,51	2,49	28,85	13,53	56,49	10,56	10,78	13,31	17,35



Graf 8- závislost napětí na deformaci tělesa č.5 v osmé sérii

5 VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ

Po vyhodnocení zkoušky je zřejmé, že největší pevnost v ohybu dosáhne laminát ze skelné tkaniny s pramenci tkanými kolmo na sebe s gramáží 580g/m^2 . U série č.5 byla dosažena průměrná hodnota meze pevnosti $285,73\text{ MPa}$. Jednalo se o zkušební těleso o tloušťce 5mm , kde jeden ze vzorků dosáhl meze pevnosti $334,68\text{ MPa}$. Průběh závislosti napětí na deformaci znázorňují jednotlivé grafy.



Obrázek 37- Zkušební těleso laminátu ze skelné tkaniny s tkanými pramenci po zkoušce

Nižší pevnosti dosáhl laminát ze skelné biaxiální tkaniny o gramáží 320g/m^2 . Nevyšší průměrnou hodnotu meze pevnosti bylo dosaženo u série č.4 $99,12\text{ MPa}$ při tloušťce vzorku 4 mm . Tato skelná tkanina by přitom měla mít nejvyšší pevnost ze všech zkoušených tkanin. Tato nízká pevnost je způsobena orientací pramenců 45° k ose zkušebního tělesa a také menší gramáží na cm^2 čtvereční. Tato orientace způsobila na vnější straně ohybu odlupování jednotlivých vrstev tkaniny (obr.38).

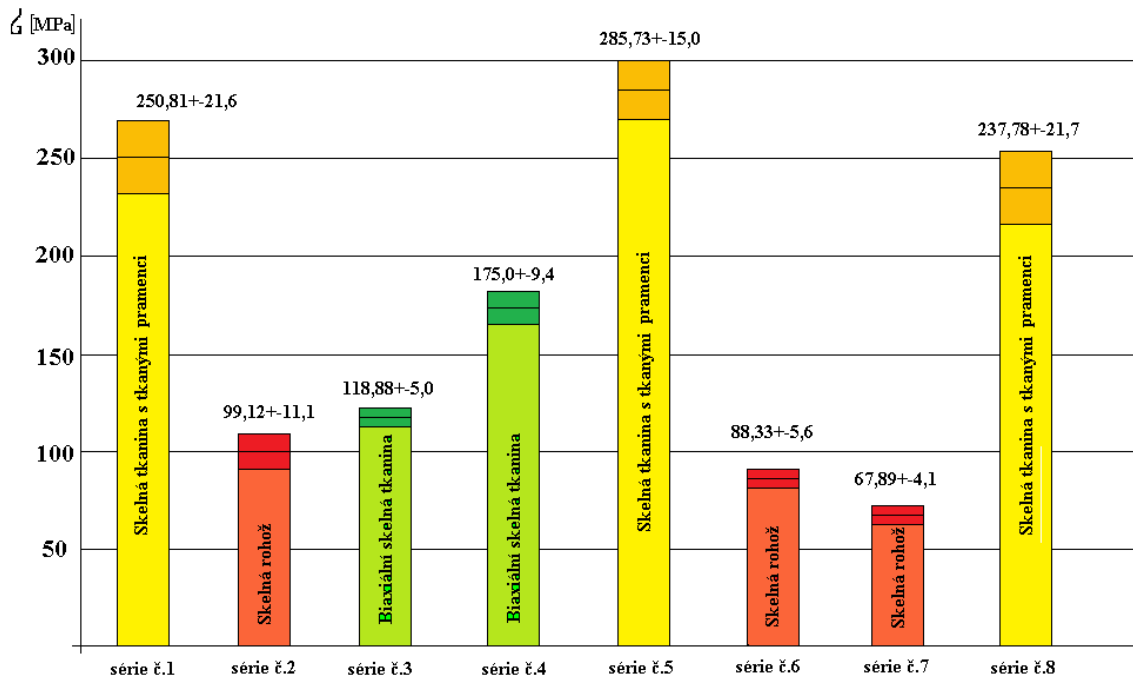


Obrázek 38- Zkušební těleso laminátu z biaxiální tkaniny po zkoušce ohybem

Nejnižší hodnoty pevnosti v ohybu dosáhl laminát ze skelné rohože s gramáží 300g/m². Nejvyšší průměrná mez pevnosti byla dosažena u série č.2- 99,12 MPa. Nejnižší mez pevností ze všech sérií má série č.7 - 67,89 MPa. Vlákná nejsou uspořádána, proto nemají vysokou pevnost a výrobek z tohoto materiálu dosahuje nejnižších pevností.



Obrázek 39- Zkušební těleso z laminátu ze skelné rohože po provedení zkoušky ohybem



Graf 9- průměrné hodnoty mezi pevnosti s nejistotou měření jednotlivých sérií

Nejistota měření u_A je rovna podílu směrodatné odchylky s a druhé odmocniny počtu zkušebních těles n .

$$u_A = \frac{s}{\sqrt{n}} \quad (1)$$

Tloušťka zkušebního tělesa a tím i množství vrstev ovlivňuje pevnost jen minimálně. Výraznější vliv na pevnost jednotlivých zkušebních těles má kvalita zpracování. Vzorky byly vyrobeny v domácím prostředí amatérským způsobem, ve vzorcích se objevovaly vzduchové bubliny, které způsobily výrazné rozdíly mezi vzorky stejného materiálu a stejných rozměrů.

V praxi se proto při výrobě rozměrných součástí, tedy i spoilerů, využívají skelné tkaniny různých velikostí pramenců. Skelné rohože se využívají v případě, že jde o výrobek menších rozměrů, výrobků kde není požadována vysoká pevnost nebo v místech, kde kvůli tvarové složitosti nemohla být použita skelná tkanina.

Z ekonomického hlediska nejdražším materiálem je skelná rohož (300g/m čtvereční) s cenou okolo 130 Kč za metr čtvereční. Biaxiální skelná tkanina (320g/m čtvereční), se pohybuje okolo 90kč za metr čtvereční. Nejlevněji vychází skelná tkanina s tkanými pramenci (580g/m čtvereční) s cenou kolem 80kč za metr čtvereční.

Při výrobě spoilerů i jiných výrobků z laminátů, je nejméně výhodnější použití skelných tkanin, nejen z důvodu vysoké pevnosti, ale i nižší ceně oproti skelným rohožím.

ZÁVĚR

Tato bakalářská práce se zabývá vlastnostmi skelných výztuží v laminátu v ohybu. V praktické části byla popsána použitá zařízení a použité materiály. Skelná tkanina s tkanými pramenci kolmo na sebe s gramáží 580g/m^2 , biaxiální skelná tkanina s gramáží 320g/m^2 a skelná rohož s gramáží 300g/m^2 . Tyto skelné výztuže byly prosyceny polyestrovou pryskyřicí Lamit 109.

Nejvyšší meze pevnosti dosáhl laminát ze skelné tkaniny s kolmo na sebe tkanými pramenci z důvodu výrazně vyšší gramáže než ostatní zkoušené výztuže.

Laminát z biaxiální skelné tkaniny dosáhl výrazně nižší pevnosti než laminát ze skelné tkaniny s kolmo na sebe tkanými pramenci. To bylo způsobeno orientací vláken 45° k ose vzorku a nižší gramáží.

Nejnižších hodnot dosáhl laminát ze skelné rohože. Vlákná nemají uspořádanou orientaci a také tato skelná výztuž měla nejnižší gramáž ze všech výztuží.

Zkouška byla výrazně ovlivněna nekvalitní výrobou zkušebních těles v domácím prostředí a různou orientací pramenců ve tkaninách. Biaxiální skelné rohože mají tu výhodu, že vlákna jsou v přímém směru a díky tomu nemůže dojít k přeřezání pramenců o sebe.

Jednotlivé průběhy zkoušek znázorňují křivky grafů závislosti zatěžujícího napětí na deformaci.

Z naměřených hodnot vyplývá, že skelné tkaniny mají vyšší pevnost než skelné rohože a tloušťka zkoušených těles, tedy počet vrstev skelné výztuže, nemá výrazný vliv na pevnost laminátu.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [7] Radomír Nedbal: Strojírenská technologie, pracovní sešit pro 1. Ročník, SPŠ Zlín
- [2] Gottfried W. Ehrenstein, Polymerní kompozitní materiály, 2006
- [3] Česká technická norma ČSN EN ISO 14125, červen 1999
- [4] Šuba, O.: Dimenzování a navrhování výrobků z plastů, VUT v Čs. Redakci VN MON, 1988
- [5] Šternschuss, A. – Zvonař, V. – Slezák, O. – Kučera, M.: Polyesterové skelné lamináty, SNTL, 1961
- [6] www.pctuning.tyden.cz
- [7] www.cs.wikipedia.org/wiki/Laminát

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

h- tloušťka zkušební tělesa [mm]

b- šířka zkušební tělesa [mm]

σ_M - maximální napětí, které zkušební vzorek snesl [MPa]

$\varepsilon_{\sigma M}$ - deformace při maximálním napětí [%]

σ_B - napětí, při kterém zkušební vzorek přestal klást odpor [MPa]

$\varepsilon_{\sigma B}$ - deformace při napětí δ_B [%]

Δy_B - deformace při napětí δ_B [mm]

Δy_M – deformace při maximálním napětí [mm]

E-modul pružnosti v ohybu [MPa]

n-počet měření

x-průměr

s-směrodatná odchylka

v-variační koeficient

l – délka zkušební tělesa [mm]

u_A – nejistota měření

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obrázek 1 – Znázornění hlavních os (ox, oy) ortotropního materiálu</i>	11
<i>Obrázek 2 – Zkušební těleso pro zkoušku tahem</i>	12
<i>Obrázek 3 – Pracovní diagram</i>	13
<i>Obrázek 4 – Zkušební vzorek před a po zkoušce tlakem</i>	15
<i>Obrázek 5 – Průběh ohybových momentů při tří- a čtyřbodovém ohybu</i>	17
<i>Obrázek 6 – Vliv směru smykových napětí na způsob zatížení</i>	18
<i>Obrázek 7 – Zkušební těleso ke stanovení interlaminární pevnosti ve smyku</i>	18
<i>Obrázek 8 – Ohybové přetvoření zkušební tělesa pro určení interlaminární smykové pevnosti</i>	19
<i>Obrázek 9 – Zkouška třibodovým ohybem ke stanovení interlam. smykové pevnosti</i>	19
<i>Obrázek 10 – Průběh poškozování u homogenních a vláknitých materiálů</i>	21
<i>Obrázek 11 – Charpppyho kladivo a zkušební vzorek</i>	22
<i>Obrázek 12 – Schéma Schenckova přístroje pro zkoušky opětovným namáháním</i>	23
<i>Obrázek 13 – Wöhlerova křivka</i>	24
<i>Obrázek 14 – Mechanické chování a) izotropního, b) ortotropního, c) obecně anizotropního plošného prvku</i>	28
<i>Obrázek 15 – Zkušební tělísko u zkoušky HRC</i>	31
<i>Obrázek 16 – Skelná tkanina</i>	31
<i>Obrázek 17 – biaxiální skelná tkanina</i>	32
<i>Obrázek 18 – Skelná rohož</i>	32
<i>Obrázek 19 – Jednodílná forma pro beztlakové tváření a) pozitivní, b) negativní</i>	34
<i>Obrázek 20 – Lisování pryžovou membránou a) vakuem, b) vakuem a přetlakem</i>	34
<i>Obrázek 21 – Lisov. pružným lisovníkem a) otevřená forma, b) forma po uzavření</i>	35
<i>Obrázek 22 - Výrobek z uhlíkového laminátu</i>	36
<i>Obrázek 23 – schéma skelné tkaniny</i>	39

<i>Obrázek 24 – Schéma biaxiální skelné tkaniny</i>	39
<i>Obrázek 25 – Schéma skelné rohože</i>	39
<i>Obrázek 26 – Plát skelného laminátu ze skelné tkaniny</i>	40
<i>Obrázek 27 – Plát skelného laminátu z biaxiální skelné tkaniny</i>	40
<i>Obrázek 28 – Plát skelného laminátu ze skelné rohože</i>	41
<i>Obrázek 29 – Orientace vláken zkušebních těles (biaxiální tkanina, tkanina, rohož)</i>	41
<i>Obrázek 30 – Schéma zkušebního tělesa</i>	41
<i>Obrázek 31 - Nařezané zkušební tělesa ze skelné rohože</i>	42
<i>Obrázek 32 – Nařezané zkušební tělesa laminátu ze skelné tkaniny</i>	42
<i>Obrázek 33 – Příklady možných typů porušení</i>	45
<i>Obrázek 34 – Univerzální zkušební stroj Zwick 1456</i>	45
<i>Obrázek 35 – Uspořádání při třibodovém zatěžování</i>	46
<i>Obrázek 36 – Závislost zatěžujícího napětí na deformaci</i>	47
<i>Obrázek 37 – Zk. těleso laminátu ze skelné tkaniny s tkanými pramenci po zkoušce</i>	56
<i>Obrázek 38 – Zkušební těleso laminátu z biaxiální skelné tkaniny po zkoušce</i>	57
<i>Obrázek 39 – Zkušební těleso laminátu ze skelné rohože po zkoušce</i>	57

SEZNAM TABULEK

<i>Tabulka 1 – Porovnání elastických charakteristik různých druhů vláken</i>	36
<i>Tabulka 2 - Vhodná zkušební tělesa pro tříbodový ohyb</i>	38
<i>Tabulka 3 – Technická specifikace stroje Zwick 1456</i>	46
<i>Tabulka 4 – Experimentálně zjištěné hodnoty série 1</i>	48
<i>Tabulka 5 – Experimentálně zjištěné hodnoty série 2</i>	49
<i>Tabulka 6 – Experimentálně zjištěné hodnoty série 3</i>	50
<i>Tabulka 7 – Experimentálně zjištěné hodnoty série 4</i>	51
<i>Tabulka 8 – Experimentálně zjištěné hodnoty série 5</i>	52
<i>Tabulka 9 – Experimentálně zjištěné hodnoty série 6</i>	53
<i>Tabulka 10 – Experimentálně zjištěné hodnoty série 7</i>	54
<i>Tabulka 11 – Experimentálně zjištěné hodnoty série 8</i>	55

SEZNAM GRAFŮ

<i>Graf 1 – Závislost napětí na deformaci tělesa č. 7 v první sérii</i>	48
<i>Graf 2 – Závislost napětí na deformaci tělesa č. 8 v druhé sérii</i>	49
<i>Graf 3 – Závislost napětí na deformaci tělesa č. 2 v třetí sérii</i>	50
<i>Graf 4 – Závislost napětí na deformaci tělesa č. 5 v čtvrté sérii</i>	51
<i>Graf 5 – Závislost napětí na deformaci tělesa č. 9 v páté sérii</i>	52
<i>Graf 6 – Závislost napětí na deformaci tělesa č. 6 v šesté sérii</i>	53
<i>Graf 7 – Závislost napětí na deformaci tělesa č. 2 v sedmé sérii</i>	54
<i>Graf 8 – Závislost napětí na deformaci tělesa č. 5 v osmé sérii</i>	55
<i>Graf 9 – Průměrné výsledné napětí s nejistotou měření jednotlivých sérií</i>	58