

Studium ohybové tuhosti a únosnosti HP kompozitu

Dalibor Hába

Bakalářská práce
2009



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav výrobního inženýrství

akademický rok: 2009/2010

ZADANÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Dalibor Hába**

Studijní program: **B 3909 Procesní inženýrství**

Studijní obor: **Technologická zařízení**

Téma práce: **Studium ohybové tuhosti a únosnosti HP kompozitů.**

Zásady pro vypracování :

1. **Zpracujte literární studii v oblasti kompozitů.**
2. **Příprava zkušebních těles pro mechanické zkoušky ohybu.**
3. **Provedení standardních ohybových testů.**
4. **Vyhodnocení získaných výsledků z hlediska praktických aplikací.**

Rozsah práce:

Rozsah příloh:

Forma zpracování : **tištěná/elektronická**

Vedoucí bakalářské práce:

doc.Ing. Oldřich Šuba CSc.

Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání bakalářské práce:

19.února 2010

Termín odevzdání bakalářské práce:

10.června 2010

Ve Zlíně dne 21.ledna 2010

.....

Podpis

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 7.6.2010

.....

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

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

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

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

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

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

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

(1) Škola nebo školské či vzdělávací zařízení mají za obvyklých podmínek právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla (§ 35 odst. 3). 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 užit 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

V teoretické části popisuje bakalářská práce druhy a vlastnosti kompozitních materiálů .

V praktické části je bakalářská práce zaměřena na experimentální studium ohybových mechanických vlastností HP kompozitů a vlivu vodního prostředí na tyto vlastnosti. Byl posuzován vliv dlouhodobého působení vody na pokles mechanického chování v ohybu.

Klíčová slova: tuhost, únosnost, kompozit

ABSTRACT

The types and material characteristics are described in the theoretical part. In the practical section I am concerned with experimental research of flexural characteristics of HP composites. It was viewed the influence of water on the declining of mechanical behavior in deflection.

Keywords: rigidity, bearing resistance, composite

Poděkování

Chtěl bych poděkovat Doc. Ing. Oldřichu Šubovi, CSc. za kvalitní a metodické vedení mé diplomové práce a Ing. Milanu Žaludkovi, Ph.D, za pomoc při získávání podkladů pro kvalitní zpracování praktické části diplomové práce.

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

OBSAH

I	TEORETICKÁ ČÁST	10
1	PROBLEMATIKA VYZTUŽENÝCH POLYMERŮ	11
1.1	DRUHY VYZTUŽUJÍCÍCH VLÁKEN	11
1.1.1	Skleněná vlákna.....	11
1.1.2	Aramidová vlákna	14
1.1.3	Uhlíková vlákna	15
1.1.4	Přírodní vlákna	18
1.2	POROVNÁNÍ VLASTNOSTÍ VLÁKEN	18
1.2.1	Tuhost (E-modul)	18
1.2.2	Pevnost	20
2	MATRICE.....	21
2.1	ÚLOHA MATRICE A POJIVA.....	21
2.1.1	Nenasycené polyesterové pryskyřice (UP-R)	22
2.1.2	Polyesterové pryskyřice.....	25
3	ÚLOHA VLÁKNA V KOMPOZITU	28
4	ZPRACOVÁNÍ – TECHNOLOGIE.....	32
4.1	ZPRACOVÁNÍ POLOTOVARŮ	32
4.1.1	Polotovary s termosetickým pojivem	32
5	ZKOUŠKY MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ.....	34
5.1	OHYB	34
II	PRAKTICKÁ ČÁST	35
6	STANOVENÍ CÍLE PRÁCE.....	36
6.1	STRUKTURA STĚN	36
6.1.1	Typy prováděných zkoušek	39
7	ZKOUŠKY V OHYBU U HP KOMPOZITŮ	40
7.1	MECHANICKÉ ZKOUŠKY	40
	ZKOUŠKA OHYBEM.....	40
7.2	STANOVENÍ SOUČiniteLE B DLE NORMY ČSN EN 978	53
	ZÁVĚR	56
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	57
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	58
	SEZNAM OBRÁZKŮ	60
	SEZNAM TABULEK.....	61
	SEZNAM PŘÍLOH.....	62
	TABULKA 22.....	63
	TABULKA 23.....	66

Úvod

HPL lamináty (high pressure laminates) definuje **norma EN 438** jsou materiály vyráběné lisováním vrstev jádrového papíru prolitého pryskyřicí za použití vysokého tlaku a teploty. Díky tomuto speciálnímu výrobnímu postupu dosahují laminátové desky HPL svých specifických vlastností, které je předurčují pro široké použití v oblasti interiéru i exteriéru. Desky jsou obvykle složeny z vrstev přírodní vláknité výztuže, kterou může tvořit například papír v určitém hmotnostním zastoupení. Výztuž se impregnuje tvrditelnou pryskyřicí (fenolová či melaminová), která se může v případě potřeby ošetřit přídatnou ochrannou akrylpolyuretanovou vrstvou. Vláknitá výztuž se určitou dobu lisuje při vysoké teplotě a vysokém tlaku. Tímto procesem produkt získává charakteristické vlastnosti a jeho povrch nabývá dekorativní barvy či vzoru. Současné HPL desky by neměly obsahovat organické sloučeniny halogenů (chrom, brom, jód apod.), které se vyskytují v pohonných plynech, dále by neměly obsahovat PVC, síru, rtuť, kadmium, azbest či ochranné přípravky na dřevo, jakými jsou pesticidy a fungicidy. HPL desky určené pro exteriérové využití by měly být mimořádně tvrdé a odolné proti otěru, poškrábání, nárazu, běžným chemikáliím, vodě, vodní páře, mrazu či teplu. V tomto širokém rozpětí HP kompozitu může být přijata jejich definice, vyhovující daným požadavkům. Pro účely uvažovaných materiálů, sestávající v makroměřítku ze dvou nebo více chemicky odlišných složek, které mají určité oddělující rozhraní. HP kompozity tvoří jednu nebo více nespojitých fází, ponořených ve spojitě fázi. Vlastnosti HP kompozitů jsou silně ovlivňovány vlastnostmi svých materiálových složek, jejich distribucí a interakcí mezi nimi. Vlastnosti systému může dávat součet vlastností složek podle jejich objemových podílů nebo složky mohou na sebe vzájemně působit synergetickým způsobem, takže zajišťují kompozitům vlastnosti, které nemohou být přičítány prostému součtu vlastností složek na základě jejich objemových podílů. Ve středoevropském klimatu se dají bez výhrad použít fasádní desky, které odolávají velmi nízkým i vysokým teplotám, například s tolerancí od -80 až do $+180$ °C. Ochranná akrylpolyuretanová vrstva a takzvaný dvojité vytvrzený povrch pomáhají zvyšovat odolnost laminátů proti povětrnostním vlivům a kyselým dešťům, vyvolaným emisemi škodlivých látek, ale také proti slunečnímu záření. Vysokotlaké lamináty mohou oslovit i svou dlouhou životností, protože při správné povrchové úpravě poslouží i 50 let. Podmínky udržitelné výstavby splňují i díky snadné údržbě a možnosti recyklace laminátů.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 PROBLEMATIKA VYZTUŽENÝCH POLYMERŮ

Je běžné, že příroda využívá účinků různorodých materiálů pro dosažení lepších vlastností a vytváří materiály připomínající materiály kompozitní. Například řez buňkou vlny a příčný výbrus epoxidové pryskyřice jednosměrně vyztužené uhlíkovými vlákny mají podobnou strukturu, lišící se ovšem rozměrem. Obdobně lze porovnávat vrstvenou strukturu epoxidové pryskyřice vyztužené uhlíkovými vlákny se strukturou bambusového stonku. V technologickém hledisku je zahrnuta snadnost výroby, zpracování a vlastností výrobku, které se hodí pro zamýšlené použití. Ekonomická stránka je vyjádřena požadavkem dostupnosti surovin, levné výroby bez nákladných investic.

Tímto je dán směr vývoje lisovacích hmot a snaha výrobců nabídnout spotřebiteli co nejširší paletu materiálů a umožnit mu tak výběr co nejvhodnějších druhů kompozitu.

Požadavek výroby kompozit 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 zlepšuje mechanické vlastnosti výrobků. Tak vznikají nové druhy kompozitních materiálů.[1]

1.1 Druhy vyztužujících vláken

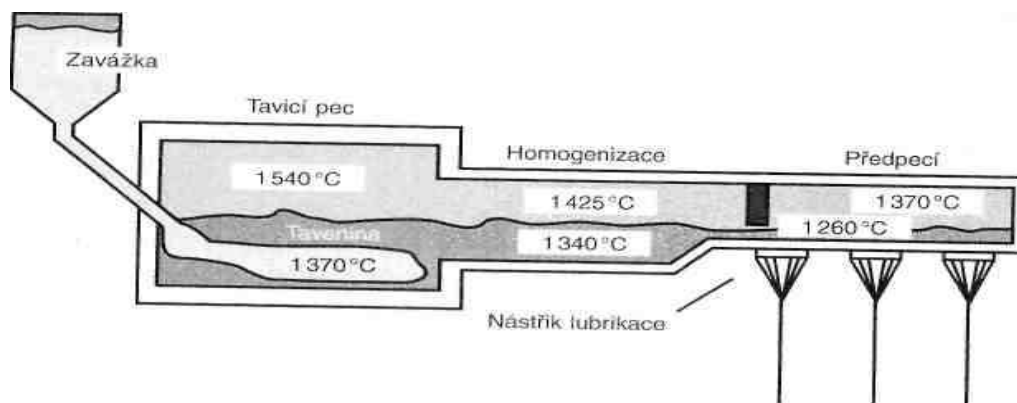
Materiály ve formě vláken se cíleně jako konstrukční prvky používají zřídka. Zajímavou skupinou materiálu se stávají teprve v kompaktní formě, jako je tomu v kompozitních materiálech. Kompozitní – vlákny vyztužené – plasty se skládají jednak z vláken s vysokou měrnou pevností, příp. tuhostí, jednak z rozmanitě přizpůsobivého úložného materiálu-matrice.

1.1.1 Skleněná vlákna

Textilní skleněná vlákna (GF-Glass Fiber) je společný název pro vlákna s pravidelným kruhovým průřezem, tažená z roztavené skloviny a používaná pro textilní účely.

Skleněná vlákna z bezalkalické skloviny jsou vynikajícím elektrickým izolantem s vysokou prostupností pro záření, proto se označují jako E – vlákna (elektrická) a jejich sklovina jako E – sklovina. Je to nejčastěji používaný druh skloviny pro výrobu vláken, který postupně jako standardní typ obsadil téměř 90% trhu. Bezalkalická skleněná vlákna – AR-

vlákna, s poněkud odlišným složením oproti E - vláknům, mají vysokou odolnost proti alkáliím a používají se pro vyztužení betonu. Dodací formou textilního skla jsou příze, skaná příze, pramenec, rohož, sekáný pramenec a krátké vlákno. Skleněná vlákna se vyrábějí tažením z trysek. Tyto trysky z platinové slitiny jsou zahřáté na takovou teplotu, aby z jejich 200 až 4000 trysek, umístěných na spodní straně předpecí, sklovina pomalu vytékala a rychle tuhla do tvaru vláken. Vlákná jsou na výstupu z trysky asi 2 mm tlustá. Teprve dloužením vysoce viskózních vláken na velmi rychle rotujícím navíjecím stroji se vlákna kalibrují na zvolený průměr, např. 10 až 14 μ m, a současně se prodlužují až na 40 000 násobnou délku. Sdružením těchto téměř neviditelných elementárních vláken vzniká spřádací vlákno.



Obrázek 1 Výroba textilních skleněných vláken tažením s trysek

Při výrobě textilních vláken se v průběhu tažení nanáší na čerstvě tažená vlákna šlichta (lubrikace) ve formě vodní emulze. Úkolem šlichty je spojit jednotlivá vlákna do manipulovatelného spřádacího vlákna; chránit citlivý povrch křehkých elementárních vláken; přizpůsobit stávající vlákna dalšímu zpracovatelskému procesu; zlepšit vazby mezi organickou pryskyřicí a anorganickým vláknem. Lubrikace obsahují mj. čtyři základní důležité složky:

- filmotvornou – vinilacetáty polymerizované do určitého stupně, polyestery a jiné pryskyřice, chránící elementární vlákna a spojující je do pramenů,
- maziva - poskytují vláknu, příp. příslušnému produktu, potřebné kluzné vlastnosti,
- apretace - obvykle na silanové bázi - typ apretace musí odpovídat použitému typu pryskyřice (matrice),

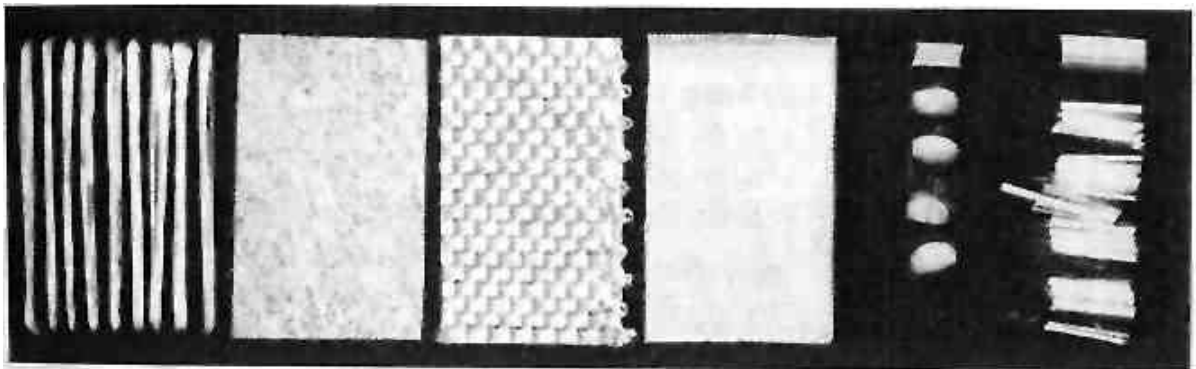
- antistatika - anorganické soli, které odvádějí elektrostatický náboj.

Protože sklovina je směrem od povrchu ochlazována a tuhne, vznikají při tažení v této oblasti pnutí. Přiměřeně tomu je vnější obal vlákna roztahován, zatímco vnitřní hmota, která je dříve v roztaveném tekutém stavu, nevykazuje žádná napětí. Po ochlazení celého průřezu a ukončeném tažení je vlákno z vnější strany pod vlastním radiálním a osovým tahovým napětím, proti kterému působí uvnitř vlákna vlastní tlakové napětí.

Při expozici vláken v 1 mol roztoku HCl je materiál vlákna vyluhováním zeslaben a po obvodu vlákna se působením vlastního tahového pnutí tvoří trhliny. Vnitřní jádro je nejdříve vystaveno vlivu zbytkového tlakového napětí, po vytvoření trhlin je však bez pnutí. Smyková napětí mezi vnější vrstvou a vnitřním jádrem jsou příčinou odloupávání vrstev. Smyková napětí vznikají uvolňováním napětí ve vnější vrstvě smrštěním a s tím spojeným příčným protažením v obvodovém směru.

Slabým místem kompozitu je fázové rozhraní vlákno-matrice, podél kterého mohou kapilárním působením pronikat chemikálie, a působit tak korozivně. Ochranou proti tomuto jevu je tlustší vrstva pojiva na povrchu laminátu a kvalitní spojení matrice a vláken. Proto se kvůli zlepšení spoje nanášejí na povrch vláken speciální lubrikace, vykazující kromě dalších funkcí dobrou přilnavost jak k vláknu, tak i k matrici.

a) b) c) d) e) f)



Obrázek 2 . Nejdůležitější typy sklovláknitých výztuží

Pro reaktivní pryskyřice: a) roving (pramenec). b) rohož, c) tkanina z pramenců, d) tkanina z vláken

Pro termoplasty: e) krátká vlákna (přibližně délky 0,22 mm), f) dlouhá vlákna (přibližně délky 5 mm)

Jednotlivá vyztužující vlákna jsou samostatně používána jen výjimečně. Ze zpracovatelských důvodů se většinou aplikují upravené produkty. Skleněná vlákna se používají pro textilní zpracování, pro vyztužování termosetů, termoplastů.[3]

1.1.2 Aramidová vlákna

Aramidová vlákna (AF - Aramid Fiber) jsou vlákna na bázi lineárních organických polymerů, jejichž kovalentní vazby jsou orientovány podle osy vlákna; předností těchto vláken je vysoká pevnost a tuhost. Molekuly jsou navzájem spojeny vazbami vodíkových můstků. Aromatická jádra v řetězcích jsou nositeli vysoké tuhosti. Odhadovaná teoretická pevnost je kolem $200\,000\text{ N} \cdot \text{mm}^{-2}$. Jediná dosud komerčně dosažitelná vlákna blízká se svými vlastnostmi těmto hodnotám jsou vlákna na bázi aromatických polyamidů, která dosahují např. při průměru vlákna $12\ \mu\text{m}$ hodnot pevnosti v tahu $3600\text{ N} \cdot \text{mm}^{-2}$ a E-modulu

$125\,000\text{ N} \cdot \text{mm}^{-2}$. Pravidelné uspořádání fenolenových jader a amidových skupin s vazbami vodíkových můstků propůjčuje řetězcům vysokou tuhost a způsobuje současně vysokou hustotu struktury uspořádání. Orientace krystalických nadstruktur a z nich složených fibril kolísá podle modelových představ více nebo méně kolem osy vláken. To odůvodňuje rozdíl hodnot skutečného a teoretického E-modulu. Výroba polyfenyltereftalamidových vláken spřádáním z taveniny není možná, protože teplota roztavení leží nad teplotou tepelného rozkladu. Vysoce krystalická vlákna se silně orientovanými molekulami se proto spřádají z vysoko-viskozního 20% roztoku v koncentrované kyselině sírové. Jednotlivá elementární vlákna se spojují a pro zlepšení zpracovatelnosti se mnohokrát propírají, neutralizují a opatřují aviváží (pomocný textilní prostředek pro zlepšení kluzných a zpracovatelských vlastností). Aramidová vlákna se mohou zpracovávat se všemi běžnými reaktivními pryskyřicemi i termoplasty. V laminátu lze využít až 70 % jejich skutečné pevnosti, při zvláště tažné matrici dokonce ještě více. V roce 2002 byla z celkové výroby vláken o hmotnosti 37 000 tun použita pouze 2 % pro vyztužené plasty. Hlavními oblastmi použití jsou náhrada azbestu v třecích a brzdových obloženích, výztuž pro pneumatiky, balistické aplikace a světlovodné kabely. Aramidová vlákna mají vzhledem k vysoké orientaci molekul záporný součinitel teplotní délkové tepelné roztažnosti ve směru vláken, podobně jako vlákna uhlíková. Protože kovalentní vazby ve směru molekul jsou daleko pevnější než vedlejší vazby mezi makromolekulami (vazby pomocí vodíkových můstků), jsou příčné osci-

lace daleko větší a působí - podobně jako rozkmitané lano - tahovými silami na kotvicí body a stahují vlákna v podélném směru dohromady. Čím je teplota vyšší, tím větší je příčná oscilace a smrštění vláken (účinek entropie). Pro zvýšení stupně osové orientovanosti řetězců molekul, a tím i zvýšení hodnot mechanických vlastností, procházejí vlákna za zvýšené teploty procesem dloužení. Aramidová vlákna se vyrábějí v různých druzích, které se liší navzájem hodnotami modulu pružnosti v tahu a tažností. Typy s nízkým E-modulem a vyšším protažením jsou schopny pojmout podstatně vyšší deformační práci než vlákna s vyšším E-modulem a nižší tažností. Aramidové vlákno má kruhový průřez a je na povrchu lehce zdrsňené; průměr vlákna je kolem $12\mu\text{m}$. Měrná hmotnost $1,45\text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ je v porovnání s ostatními vyztužujícími vlákny nízká a tím je vedle vysoké meze pevnosti v tahu další vynikající vlastností. Aramidová vlákna jsou na trhu ve formě pramenců, přízí, tkanin a povrchových rohoží.

1.1.3 Uhlíková vlákna

Uhlíková vlákna (CF - Carbon Fiber) 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. Výchozí surovinou pro výrobu uhlíkových vláken jsou tři materiály:

- celulóza - vyrobená vlákna však mají méně dokonalou strukturu, používají se převážně jako izolační materiál pro vysoké teploty;
- polyakrylonitril (PAN) - používá se od r. 1980 stále častěji, vlákna z něj vyrobená jsou považována za standardní vlákna;
- smola, ze které se nákladným způsobem připravují vlákna, jejichž konečná cena je vzhledem k nízké ceně výchozí suroviny příznivá. Tato vlákna mají velmi vysokou hodnotu E-modulu a velice dobré tepelné a elektrické vlastnosti. Jejich pevnost v tlaku je ve srovnání se standardními vlákny podstatně nižší, protože vazby mezi jednotlivými grafitovými rovinami jsou řídké. Na trhu mají pouze malý podíl. Nejčastěji byla používána standardní vlákna, příp. vlákna se střední hodnotou pevnosti, která byla zpracovávána na náročnější aplikace ve formě nekroucených pramenců. Pramence byly složeny z 1000 až

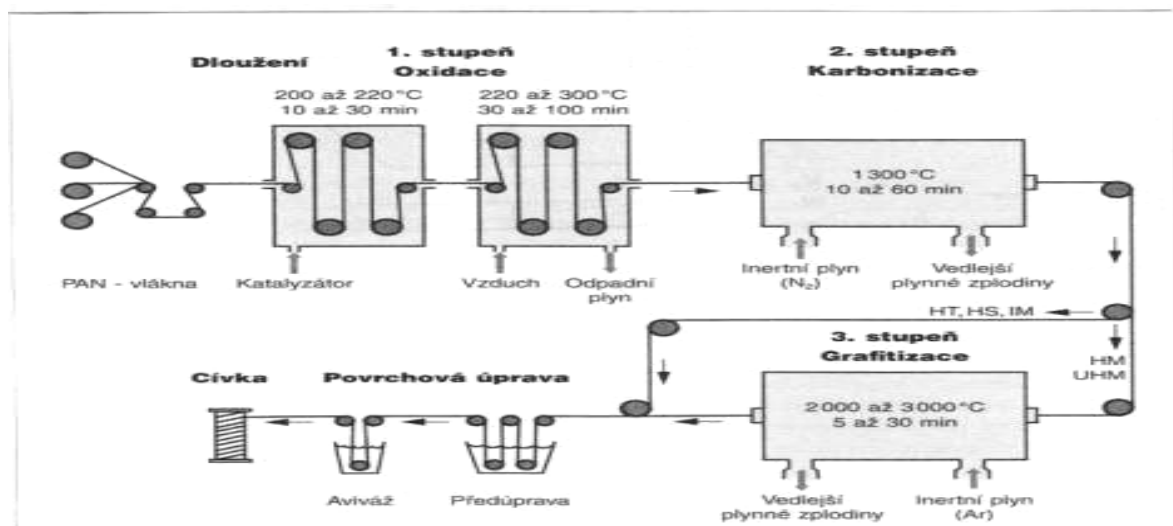
12000 elementárních vláken, u méně náročných aplikací z 48000 vláken. Pramence s nižším počtem „konců“, tzv. „small“ nebo „low tow“ (< 24000 elementárních vláken), se méně smyčkují, snadněji se tkají a propojují maticí než pramence s vyšším počtem konců, tzv. „large“ nebo „heavy tow“ (> 24000 vláken), které umožňují položení většího množství vláken současně, zejména pro jednodušší průmyslové aplikace. Předpokladem pro vysokopevnostní a vysokomodulová vlákna je co nejtěsněji uložená kontinuální síť silných vazeb. Vzhledem k požadované nízké měrné hmotnosti materiálu je vhodné použít pro tyto účely prvky prvních dvou řad periodické soustavy, např. bor, uhlík, dusík, kyslík a křemík. Nejpevnější kovalentní vazby nemusí být přitom uspořádány trojrozměrně. U vláken s převážně jednosměrným přenosem sil postačují jedno- nebo dvourozměrné molekulární struktury v ose vlákna. Uhlíková vlákna se skládají z více než 90 % z uhlíku, < 7 % dusíku, < 1 % kyslíku a < 0,3 % vodíku. Mají průměr mezi 5 a 10 μm . E-modul a pevnost se mohou měnit v širokém rozsahu. Jsou závislé na stupni orientace uhlíkových vrstev a na výskytu vadných míst, která vznikla ve vláknech během výroby. Teoreticky možné hodnoty mechanických vlastností, vycházející z hodnot energie kovalentních vazeb grafitového monokrystalu ve směru vrstev, dosahují až $1\,000\,000\ \text{N} \cdot \text{mm}^{-2}$ pro E-modul a $100\,000\ \text{N} \cdot \text{mm}^{-2}$ pro pevnost.

E-modul měřený kolmo na směr vrstev dosahuje kvůli chybějícím kovalentním vazbám hodnot pouze kolem $4000\ \text{N} \cdot \text{mm}^{-2}$. Silná anizotropie se projevuje i na tepelné roztažnosti, která dosahuje ve směru rovnoběžném s vrstvami uhlíku, tj. u vláken ve směru osy vlákna, dokonce mírně záporných hodnot. Průmyslová výroba uhlíkových vláken využívá hlavně dva výrobní postupy: technicky významnější je postup využívající polyakrylonitril jako „prekurzor“, v druhém případě se vychází ze surovin bohatých na uhlík.

- Polyakrylonitril (PAN) je nejprve dlužen k dosažení co největší orientace molekul ve směru osy vlákna, poté jsou vlákna stabilizována zahříváním na teplotu 200 až 300 °C pod mechanickým napětím za přístupu vzduchu. Přitom se PAN dehydruje a současně přemění v důsledku cyklizace nitrilových skupin na žebříčkovitý polymer. Ve druhém stupni výroby se žebříčkovitá struktura polymeru přemění pyrolýzou (karbonizací) v inertní atmosféře při teplotách maximálně do 1 600 °C na grafitickou strukturu. Vlivem silně dluženého výchozího polymeru a působícího tahového napětí dosáhnou uhlíkové vrstvy dobrého usměrnění rovnoběžně s osou vlákna. Takto vytvořená mikrostruktura způsobuje vysoké hodnoty pevnosti a E-modulu. Tímto postupem lze připravit vlákna s pevností více než $5000\ \text{N} \cdot \text{mm}^{-2}$ (tzv. *vysokopevnostní vlákna*). Následujícím tepelným procesem, který probíhá až při

2500°C, mohou být vyrobena vlákna s hodnotami E-modulu až přes 400 000 N · mm⁻² (tzv. vysokomodulová vlákna), mající však nižší pevnost. Pevnost a E-modul standardních uhlíkových vláken je asi 3 500, příp. 230 000 N · mm⁻².

- Druhý postup používaný k výrobě uhlíkových vláken vychází ze surovin bohatých na uhlík, jako jsou smoly na bázi kamenouhelného dehtu nebo dehtů vznikajících při destilaci ropy. Tyto suroviny se tepelně zpracují při teplotě nad 350 °C na *mezofázi*, tj. přechodový stupeň mezi trojrozměrně uspořádanou krystalickou fází a izotropní kapalnou fází. Mezo-fáze je vysoce anizotropní a obsahuje vysoký podíl kapalných krystalů. V průběhu spřádání vznikají pak z taveniny za působení hydrodynamických jevů vlákna s vysokým stupněm orientace v osovém směru. Při následné stabilizaci a karbonizaci při teplotě až 2000 °C dochází k přeměně na uhlík při současném zachování, příp. dalším zlepšení orientace. Tímto způsobem se mohou vyrábět vlákna s velmi vysokou hodnotou E-modulu až do 700000 N · mm⁻², která však mají v porovnání s vlákny vyrobenými z PAN nižší pevnost (asi 2000 N · mm⁻² proti 3 500 N · mm⁻² u PAN). Ve třetím stupni výroby proběhnou žíháním při teplotách až 3000°C přeměny připomínající rekrytalizaci, které mohou být umocněny současným dlužením vláken. Grafitizací, příp. grafitizací za dlužení, se mohou vyrábět vysokomodulová uhlíková vlákna s vysoce orientovanou strukturou ze standardních uhlíkových vláken. Používané extrémní teploty jsou příčinou vysoké ceny vláken (16 €/kg a více).[3]



Obrázek 3 Schéma výroby uhlíkových PAN - vláken

1.1.4 Přírodní vlákna

Pro vyztužování kompozitu jsou z přírodních vláken vhodná pouze vlákna rostlinná, které mají základ celulózu. Mezi ně patří len, konopí, sisal, juta, ramie a bavlna. K jejich výhodám patří odolnost proti stárnutí a čichová nezávadnost při měnicích se klimatických podmínkách. Pozoruhodné jsou i pevnosti v tahu. Vzhledem k nízké měrné hmotnosti jsou tato přírodní rostlinná vlákna zajímavou surovinou pro lehké konstrukce. Jako přednosti lze uvést: nízkou hustotu, malou abrazivitu při mechanickém opracování, výhodnou likvidaci spalováním. Nevýhody naopak jsou: závislost vlastností vláken na podmínkách jejich růstu, citlivost na působení vlhkosti, omezená možnost volby matrice vzhledem k nebezpečí rozkladu vláken při vysoké teplotě zpracování (odolnost do 200 C°), nákladná předběžná úprava pro zlepšení vazby s matricí, omezená délka vláken, možnost změn vyvolaných biologickým napadením.

1.2 Porovnání vlastností vláken

Vlastnosti vláken lze porovnat z deformačního chování jednosměrně vyztužených laminátů (při stejném obsahu vláken), namáhaných rostoucím tahovým namáháním ve směru výztuže. Uhlíková vlákna vykazují nejvyšší hodnoty pevnosti a tuhosti. - viz.tabulka 1.[3]

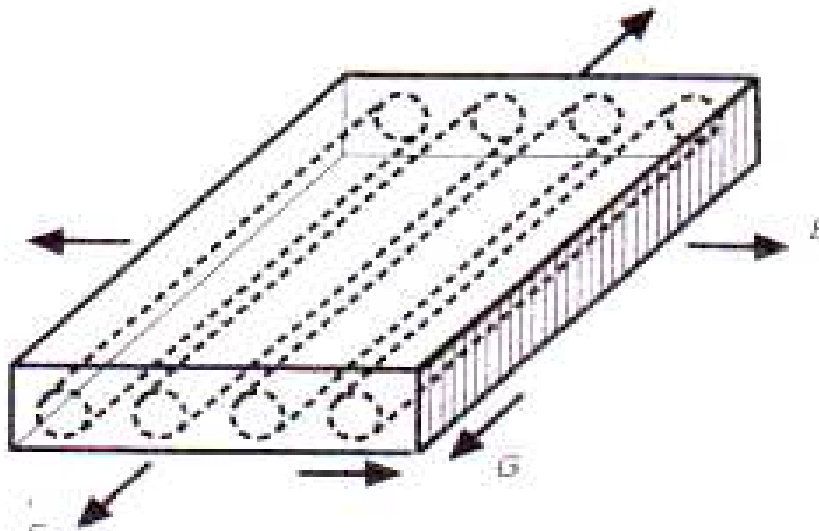
Tabulka 1 Porovnání mechanických vlastností přírodních a skleněných vláken.

Vlákno	Vlastnosti	Sklo	Konopí	Len	Juta	Sisal
E-modul (N.mm ⁻²)		75 000	70 000	30 000	55 000	20 000
Mez pevnosti v tahu(N.mm ⁻²)		3 500	600	750	550	600
Tažnost (%)		4	1,6	2,0	2,0	2,0
Hustota (g · cm ⁻³)		2,54	1,45	1,48	≈1,4	1,45

1.2.1 Tuhost (E-modul)

Zásadní vliv vlastností vláken na tuhost kompozitu lze ukázat na hodnotách modulů pružnosti jednosměrně vyztužené vrstvy (obr. 4). Spolupůsobení vláken a matrice v kompozitním materiálu je složité, a proto při stanovování vlastností kompozitu na základě vlastností

jednotlivých složek (v nejjednodušším případě vláken a matrice) a jejich podílu a geometrického uspořádání je nutné přijmout řadu zjednodušujících předpokladů. Prvek jednosměrně vyztuženého kompozitu tvoří základní (nejjednodušší) element při pevnostních a deformačních analýzách konstrukcí z vláken vyztužených plastů. V prvním přiblížení lze předpokládat, že při namáhání tahem ve směru vláken jsou deformace matrice i vláken v tomto směru stejné. Z toho vyplývá vztah pro modul $E_{||}$, který vlastně představuje pravidlo směsí. Předpokládáme-li, že při namáhání v příčném směru působí v obou složkách stejná napětí, pak lze dospět k vzorci pro modul E_{\perp} . V obou případech se nebere zřetel na rozdílné hodnoty Poissonových čísel vlákna a matrice, což způsobuje značnou chybu zejména v případě modulu E_{\perp} . Jednoduchost těchto vztahů však umožňuje názorně ukázat vliv jednotlivých složek na výsledné hodnoty tuhosti kompozitu.



Obrázek 4 Základní elastické charakteristiky jednosměrně vyztužené vrstvy.

Protože hodnoty E-modulu vláken jsou daleko vyšší než hodnoty modulu plastové matrice, závisí konečná hodnota E-modulu kompozitu zásadním způsobem na obsahu vláken a jejich uspořádání ve hmotě. Nejvyšší hodnoty E-modulu se dosáhne v případě, jsou-li všechna vlákna orientována ve směru namáhání. V příčném směru je vliv tuhosti vláken menší. V každém případě však vložení vláken do poddajnější matrice znamená zvýšení její tuhosti. Hodnoty $E_{||}$ a E_{\perp} z obr.5 tak u kompozitu představují hodnoty mezní. Vztah pro $E_{||}$ je možné použít pro stanovení modulu pružnosti vlákna $E_{||f}$, jsou-li známy obsah vláken ϕ a moduly pružnosti matrice E_m a kompozitu $E_{||}$. V obr.5 uvedený vztah pro E_{\perp} je pro určení modulu $E_{\perp f}$ nevhodný.

1.2.2 Pevnost

Pevnost laminátu při ohybu je velmi silně závislá na vrstvení. U laminátů s jednoznačným směrem tahového namáhání, proto krajní vrstvy musí mít vlákna orientovaná ve směru tahového napětí. Velkou únosnost při ohybovém namáhání mají tzv. sendvičové konstrukce, u nichž je mezi dvě laminátové desky vložena distanční vložka vytvořená například z pěnové hmoty, balzy, voštin nebo z distanční skleněné tkaniny (distanční tkanina může být použita pouze s rozpouštědlovými pryskyřicemi). Modul pružnosti v ohybu u laminátů není shodný modulem pružnosti naměřeným při tahovém namáhání a pevnost v ohybu. K měření ohybových vlastností je používáno buď tříbodového (ASTM D 7901) nebo čtyřbodového ohybu (ASTM D 62722), podpory jsou válečky o průměru 12,7 mm a délce 63,5 mm. Poměr vzdálenosti podpor ku tloušťce tělesa by měl být minimálně pevnost v tahu vlákna lze výhodně stanovit zatěžováním pramence prosyceného pryskyřicí. Naměřené hodnoty, přepočtené na 100% objemový podíl vláken, jsou pro praktické úvahy plně dostačující. Mez pevnosti kompozitu $\sigma_{Pt \parallel}$ ve směru vláken může být odhadnuta pomocí pravidla směsí:

$$\sigma_{Pt \parallel} = \varphi \sigma_{Pt \parallel} + (1 - \varphi) \sigma_m,$$

kde je.

φ - objemový podíl,

σ_m - napětí v matrici při lomu.

Protože $\sigma_m \ll \sigma_{Pt \parallel f}$, platí $\sigma_{Pt \parallel f} = \varphi \sigma_{Pt \parallel f}$, z čehož pro mez pevnosti vlákna plyne

$$\sigma_{Pt \parallel f} = \sigma_{Pt \parallel} / \varphi.$$

2 MATRICE

2.1 Úloha matrice a pojiva

Pod pojmem matrice se rozumí materiál, který je prosycen systém vláken a partikulárních komponent tak, že po zpracování vznikne tvarově stálý výrobek. Vzniklá surovina se označuje jako kompozit.

Úkolem matrice je zaručení geometrického tvaru, zavedení a přenos sil, ochrana vláken, tj.:

- přenos namáhání na vlákna,
- převod namáhání z vlákna na vlákno,
- zajištění geometrické polohy vláken a tvarové stálosti výrobku,
- ochrana vláken před vlivy okolí.

Zásadním hlediskem pro kvalitu kompozitu je zajištění adheze na fázovém rozhraní matrice-vlákno. Pro dosažení lepší fyzikální a příp. i chemické vazby mezi vláknem a matricí se nanese na vlákno apretace vhodná pro určitý druh matrice. Matrice musí mít vhodnou viskozitu a povrchové napětí, aby vlákno smočila úplně a bez bublin.

U polymerních kompozitu se matrice dělí na termosety (reaktoplasty) a termoplasty. Původně se pro kompozity používaly pouze vyztužené nenasycené polyesterové (UP-R) nebo epoxidové (EP-R) pryskyřice. Tyto reaktivní pryskyřice tvoří i dnes většinu kompozitních aplikací. Mají tu přednost, že jsou ve výchozím stavu nízkomolekulární a většinou při normální teplotě v tekutém stavu. I v případě, že jsou zpracovány ve formě taveniny, je jejich viskozita nižší než viskozita taveniny termoplastu. Viskozita reaktivních licích pryskyřic se pohybuje při teplotě zpracování řádově ve stovkách mPa . s, zatímco u termoplastů dosahuje hodnot 10^3 až 10^5 mPa . s. Proto se termosety snadněji zpracovávají, snadněji smáčejí a lépe prosycují vláknem. Energetické nároky na prosycování vláken jsou ve srovnání s termoplasty nižší, protože zpracování probíhá při podstatně nižších teplotách. Zpracovatelské teploty termoplastů jsou mnohem vyšší a jsou omezeny teplotou rozkladu; jejich viskozita při zpracování je ve srovnání s termosety sto- až tisícinásobná. Termosetické pryskyřice se vytvrzují přidávkem katalyzátoru a urychlovače, případně dodáním energie (teplo, záření)- tak získá kompozit své konečné vlastnosti. Tyto trojrozměrně zasíťované materiály dosahují sice vysokých hodnot pevnosti a tuhosti (E – modul), ale jsou

často křehké a jejich tažnost se pohybuje v řádech procent. Zlepšení houževnatosti lze docílit přidávkem modifikačních přísad.

Výhodou termoplastů oproti termosetům je právě jejich houževnatost. Jen minimum termoplastových kompozitu dosahuje obdobných hodnot E – modulu, tepelné odolnosti a odolnosti chemickým vlivům jako termosety. Výhodou termoplastů je, že v průběhu jejich zpracování probíhá pouze roztavení a ztuhnutí matrice a nikoliv chemický proces, který by ovlivnil jakost výrobku nebo narušoval životní prostředí. Termoplast prosycuje vlákna v roztavené fázi, což je vzhledem k řádově vyšší viskozitě rozdíl od reaktivních pryskyřic zpracovávaných v kapalném stavu, přímo u výrobce, nýbrž v samostatném výrobním postupu – obdobně jako u prepregů. Termoplastické lisovací hmoty vyztužené krátkými vlákny o délce kolem 0,2 mm, vhodné pro sériovou výrobu vstřikováním, jsou dnes běžně používány a jejich podíl na trhu je daleko vyšší než podíl termosetů. Polypropylen, polyamid, polyester, polykarbonát a mnoho dalších termoplastů, vyztužených 50 a více procenty skleněných nebo uhlíkových vláken, patří mezi materiály pro velmi namáhané aplikace. Menší, ale stále rostoucí skupinu, tvoří termoplasty vyztužené rohoží nebo tkaninou, které se zpracovávají na velkoplošné dílce lisováním. Plasty vyztužené skleněnými vlákny dosahují - v závislosti na použitých složkách - hodnot mechanických vlastností ve velmi širokém rozsahu.[3]

2.1.1 Nenasycené polyesterové pryskyřice (UP-R)

Tyto reaktivní pryskyřice jsou bezbarvé, až slabě nažloutlé roztoky aktivních rozpouštědel, které je možno vytvrzovat za normální nebo zvýšením teploty, aniž by vznikaly těkavé vedlejší produkty. Při vytvrzování se uvolňuje reakční teplo a dochází k objemovému smrštění o 5 až 9 %. Oligomerní lineární molekuly nenasycené polyesterové pryskyřice obsahují reaktivní dvojně vazby. Vysokoviskozní pryskyřice se rozpouštějí ve styrenu, který současně působí při vytvrzování jako kopolymerační monomer. Vytvrzují se radikálovým mechanismem. Vzhledem k nízké viskozitě, dobrému smáčení vláken, vysoké (resp. pružně regulovatelné) rychlosti vytvrzování a přiměřeně nízké ceně jsou UP-R v mnoha případech nejčastěji používaným materiálem pro kompozitní aplikace.

UP-R (ČSN EN ISO 3672-1, 2) jsou známy již od roku 1936 a v kompozitech se uplatňují nejvíce. Přes 70 % výroby těchto pryskyřic je zpracováno ve formě kompozitu. Existuje mnoho typů polyesterových pryskyřic s nejrůznějšími vlastnostmi, které se liší druhem zá-

kladní molekuly. Nenasycené polyesterové pryskyřice se vyrábějí reakcí dikarbonových kyselin (např. orto-, izo- nebo tereftalové, fumarové, maleinové kyseliny) s glykoly (např. 1,2-propylenglykol, neopentylglykol). Kromě kyseliny maleinové, resp. jejího anhydridy, se používají nejčastěji (vzledem k nízké ceně) anhydridy kyseliny ftalové. Použití kyseliny ortoftalové zlepšuje zpracovatelské vlastnosti a zvyšuje chemickou odolnost, kyselina tetrahydroftalová zvyšuje houževnatost a tepelnou odolnost, kyseliny izoftalová a tereftalová jsou základem pro velmi kvalitní kompozity odolné proti hydrolyze. Levnou surovinou je i dicyklopentadien (DCPD), který spolu s nenasycenými kyselinami a glykoly tvoří produkt používaný pro povrchy s nízkým prorážením struktury výztuže, který se např. používá při stavbě lodí. Důležitou úlohu ve stavbě makromolekuly hraje délka polyesterového řetězce, obsah dvojných vazeb a další detaily stavby molekuly, např. flexibilní prvky. Nenasycená polyesterová pryskyřice je tím reaktivnější, čím vyšší je obsah polymerizovatelných dvojných vazeb ve výchozích surovinách. Se stoupající reaktivitou se zvyšuje hustota sítě kopolymeru, zvětšuje se množství uvolněného reakčního tepla a smrštění polymeru. Takové vysoce reaktivní pryskyřice mají vysokou teplotu skelného přechodu a dobrou tuhost. Vzhledem k vysokému počtu síťovacích míst potřebují vytvrzovat nebo dotvrzovat při vysoké teplotě, kdy je dosaženo dostatečně vysokého stupně volnosti molekuly. Kromě toho lze hustotu sítě řídit i stupněm vytvrzení.

Lisovací hmoty z nenasycených polyesterových pryskyřic je nutno zcela vytvrdit a zamezit tak možným změnám při jejich aplikaci (dodatečné smrštění, nasákavost, snížená chemická odolnost). Vytvrzování většiny těchto hmot je při pokojové teplotě silně zpomaleno působením vzdušného kyslíku, nezakryté plochy zůstávají lepivé.

Viskozita pryskyřice je z větší části závislá na obsahu styrenu, který se pohybuje v rozsahu 30 až 50 %. Aby byla pryskyřice snadněji zpracovatelná a lépe prosycovala vlákna, může zpracovatel snížit viskozitu směsi pryskyřice zvýšením obsahu styrenu v určitých hranicích (vyšší obsah styrenu však působí zkřehnutí).

Výběrem výchozích materiálů a pomocí různých přísad lze u nenasycených polyesterových pryskyřic měnit zpracovatelnost i vlastnosti vyrobených lisovacích hmot ve velkém rozsahu. Přísady se často používají jako objemové plnivo i jako zlevňující materiál. Zvyšují mj. viskozitu, a ovlivňují tak zatékavost a zpracovatelnost. Mezi důležitá plniva patří křída, kaolin a hydroxid hlinitý (ten v přídatku 1 : 1 snižuje především hořlavost). Přísady snižují

smrštění (zvýšená rozměrová stálost při zpracování) a součinitel tepelné délkové roztažnosti (zvýšená rozměrová stálost při používání).

Kromě přísad je možno měnit vlastnosti nenasyčených polyesterových pryskyřic změnou chemické struktury a přidávkem aditiv. Ke zlepšení chemické odolnosti i jiných vlastností je vhodné použít nenasyčenou polyesterovou pryskyřici se zvlášť dlouhým řetězcem nenasyčeného polyesteru, tj. s vyšší molární hmotností. To však nelze dobře uskutečnit u standardních pryskyřic na bázi kyseliny ortoftalové, ale pouze u pryskyřic na bázi kyseliny izo- nebo tereftalové. Tyto vysoce kondenzované pryskyřice však vyžadují přídavek 45 hm. % styrenu místo obvyklých 35 hm. % u standardních pryskyřic. I přesto je jejich viskozita pro zpracování velmi vysoká.

Molekulové hmotnosti nenasyčených polyesterových pryskyřic nejsou v katalogových listech uváděny. Jde je stanovit, je-li známa viskozita a obsah styrenu u neplněných pryskyřic. Pouze středně kondenzované pryskyřice na bázi kyseliny izoftalové mají při stejném kondenzačním stupni horší konečné vlastnosti než pryskyřice na bázi kyseliny ortoftalové.

Odolnost proti hydrolýze stoupá se zvyšující se molární hmotností. Vysoké odolnosti proti alkáliím se dosáhne teprve tzv. sterickou zbranou, kdy se do molekuly zabuduje speciální glykol - neopentylglykol nebo alkoxylovaný bisfenol A. Účinek těchto glykolů je silnější než vliv speciálních modifikujících pryskyřic.

Z přehledů chemických odolností pryskyřice proti působení nedůležitějších chemikálií je zřejmé, které typy jsou použitelné v určitém teplotním rozsahu, nikoli však to, který z uvedených typů pryskyřice je nejodolnější. Je známa řada příkladů, kdy levnější standardní pryskyřice na bázi kyseliny ortoftalové výrazně odolností převyšuje tzv. chemicky odolné speciální pryskyřice; to platí i v případě, kdy se omezí na speciální hydrolýze odolnost pryskyřice. Jednoduše řečeno, neexistuje univerzální chemicky odolná nenasyčená polyesterová pryskyřice.

Pro dosažení dobré adheze mezi vláknem a matricí je nutno provést předúpravu vlákna, např. přidávkem apretury, což může částečně odporovat požadavkům textilního zpracování (spřádání, tkaní apod.). Aby se zamezilo hromadění mnoha po sobě následujících výrobních procesů, je nutno vybrat pro vlákno takovou lubrikaci, která vyhoví jak pro textilní zpracování, tak pro vyztužení plastu. Lubrikace obsahují vazebný prostředek, který tvoří pevnou vazbu mezi vláknem a matricí. Skutečný mechanismus reakce není dosud zcela objasněn. Mezi nejběžnější vazebné prostředky patří organosilany, zejména pro kombinaci

skleněných vláken a polárních plastů. Modifikované nepolární plasty (např. polyolefiny) slouží jako vazebný prostředek pro odpovídající druh matrice. Není nutno je nanášet přímo na vlákno, ale lze je použít pro formulování zpracovávaných směsí jiným způsobem. Dobrá adheze mezi vláknem a matricí zlepšuje mechanické a tepelné vlastnosti výrobků tak, že daleko překonávají vlastností výrobků z neupravených vláken. [3]

2.1.2 Polyesterové pryskyřice

Skleněná výztuž je nositelem mechanických vlastností laminátů, pryskyřice jako pojivo výztuže rozvádí zejména mechanické namáhání rovnoměrně na všechna vlákna výztuže a chrání je před mechanickým nebo chemickým poškozením, tj. dodává laminátu odolnost proti chemickým, povětrnostním a jiným vlivům.

Základními surovinami pro výrobu pryskyřic jsou nenasycené dikarbonové kyseliny, resp. jejich anhydridy, dvojmocné alkoholy a monomery, ve kterých se vyrobený polyester rozpouští. Vedle nenasycených kyselin se používá i dikarbonových kyselin nasycených, které zlepšují mechanické vlastnosti výrobků, dále vícesytných kyselin a alkoholů pro zmenšení sklonu ke krystalizaci a zvýšení tepelné odolnosti a konečně monokarbonových kyselin a monoalkoholů, kterými se zmenšuje viskozita pryskyřice a zlepšuje snášenlivost s monomerem.

Vlastní polyester lze pokládat za polyfunkční monomer, protože má ve svém řetězci více dvojných vazeb, zpravidla tři až pět na jednu molekulu. Typickým a nejčastěji používaným komonomerem je styrén, který je dvojfunkční. Vytvrzovací proces je pak radikálovou kopolymerací obou složek. Vytvrzená polyesterová pryskyřice je netavitelná a nerozpustná. Při zahřívání však měkne a v některých rozpouštědlech (acetonu, chloroformu, apod.) bobtná. Čím dokonaleji byla vytvrzená, tj. čím hustší je zesíťování, tím je tepelně odolnější a tím méně bobtná. Stejný vliv má stupeň vytvrzení i na mechanické vlastnosti. Proto je stupeň vytvrzení předmětem stálého zájmu.

Polyesterové pryskyřice přicházejí na trh v několika typech:

- 1) *univerzální typ pro výrobu laminátů*

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, kdežto 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 odlitky nepraskají jak tomu bývá u reaktivnějších pryskyřic. Pro svou pružnost se také hodí k povrchové úpravě laminátů (předželatinový nátěr), neboť povrchové vrstvy pryskyřice neobsahují ztužující vlákno a jsou křehké, při úderu snadno praskají. Proto se do nich přidávají ještě typy změkčující - obvykle vyrobené na bázi kyseliny adipové nebo sebakové.

2) *tepelně odolné pryskyřice*

Běžné typy pryskyřic jsou tepelně celkem málo odolné, a proto je použití laminátů omezeno na teplotu do 80-100°C. Pro vyšší teploty se musí volit speciální pryskyřice s větší tepelnou odolností.

3) *pryskyřice thixotropní*

Na svislých stěnách forem při kontaktním tváření se běžné typy pryskyřic neudrží a stékají dolů. Tím vznikají nehomogenní lamináty s místy nepropojenými dostatečně pryskyřicí a málo mechanicky pevnými. Na taková místa se nanáší thixotropní pryskyřice, která nemůže téci, ale je přitom dostatečně málo viskózní, aby se do ní dal dobře vmíchat katalyzátor i urychlovač.

4) *pryskyřice stabilizované proti UV paprskům*

Obsahují malé procento látek absorbujících UV paprsky stejné délky jako polyesteru. Tyto látky chrání lamináty vystavené slunečnímu záření před žloutnutím a poklesem mechanických vlastností. Musí mít určité vlastnosti, jako je dobrá rozpustnost v polyesterových pryskyřicích, a nesmějí zabraňovat vytvrzování ani se nesmějí porušovat běžnými vytvrzovacími katalyzátory.

5) *pryskyřice neinhibované*

Vrstva pryskyřice, která je ve styku se vzdušným kyslíkem, se špatně vytvrzuje za normální teploty. Proto jsou lamináty vyrobené kontaktním tvářením poněkud lepkavé na plochách nechráněných před vzdušným kyslíkem. Tato lepkavost se odstraní tím, že se laminát nastříká tzv. neinhibovanou pryskyřicí, která obsahuje několik setin až desetin procenta parafinu nebo jiné voskovité látky, prakticky nerozpustné ve vytvrzující se pryskyřici. Tato látka při vytvrzování vyplyne na povrch a v tenkém filmu chrání pryskyřici před nevíтанým účinkem vzdušného kyslíku. Těchto pryskyřic se také může použít pro beztlakové tváření přímo při laminování.

6) *nehořlavé pryskyřice*

Velkou nevýhodou polyesterových laminátů je jejich hořlavost. Proto se některé výrobky zhotovují z tepelně velmi odolných pryskyřic, které se těžko přeměňují v plyny. Tzv. *samozhasitelné* pryskyřice obsahují chlór nebo jiné látky, které potlačují reakce probíhající během hoření, takže hořící laminát po oddálení od plamene nebo jiného zdroje ohně zhasne. Tuto samozhasitelnost lze vyvolat i u běžných typů pryskyřic přidáním některých změkčovadel (chlórované parafíny a vosky) nebo látek obsahujících chlór, fosfor, dusík, bór, organické sloučeniny antimonu nebo plniva, jako je kysličník antimonitý a chlorid antimonitý, nebo jejich kombinací. Nevýhodou těchto látek, zvláště změkčovadel, je jejich nepříznivý vliv na mechanické pevnosti laminátů a na jejich tepelnou odolnost.[5]

3 ÚLOHA VLÁKNA V KOMPOZITU

Vyztužením se rozumí zvýšení pevnosti a tuhosti, které vznikne uložením výztuže do základního materiálu (matrice), přičemž musí být splněny tyto podmínky:

- vyztužující vlákna musí být pevnější než matrice
- vyztužující materiál musí mít vyšší tuhost než matrice
- matrice se nesmí porušit dříve než vlákno

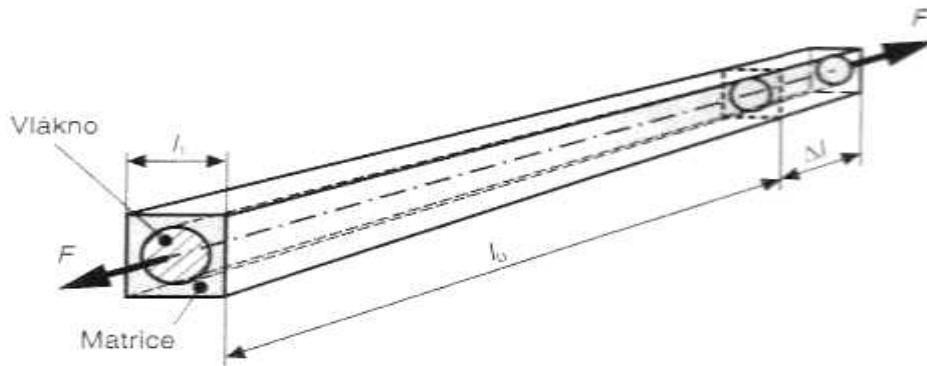
kde je

E_m , příp. E_f - modul pružnosti matrice, příp. vlákna, v tahu,

ε_{mP} , příp. ε_{fP} - mezní prodloužení (tažnost) matrice, příp. vlákna,

σ_{mP} , příp. σ_{fP} - pevnost matrice, příp. vlákna.

Namáhání ve směru vláken



Model elementárního vlákna uloženého v matrici

Obrázek 5 Model elementárního vlákna uloženého v matrici

z obrázku 5, kde je zobrazen jednoduchý element kompozitu zatížený silou F , lze odvodit vztah pro rovnováhu sil v případě namáhání ve směru vlákna a kompatibilitu deformací modelu vlákno-matrice (obě složky se ve směru podélném (II) deformují stejně):

$$\mathbf{F} = \mathbf{F}_f + \mathbf{F}_m$$

$$\sigma_{\parallel} \cdot \mathbf{A} = \sigma_f \cdot \mathbf{A}_f + \sigma_m \cdot \mathbf{A}_m$$

$$\Delta l/l_0 = \varepsilon_{\parallel} = \varepsilon_f = \varepsilon_m$$

kde je

A - celková plocha průřezu elementu,

A_f, A_m - plochy průřezů složek

F - působící síla,

l₀ - počáteční délka,

Δl - protažení (změna délky),

Ů_{||}, Ů_f, Ů_m - napětí v kompozitu a jeho složkách.

Hookeův zákon pro jednoosou napjatost pro vlákno a matici:

$$\mathbf{\hat{O}}_f = \mathbf{E}_f \cdot \boldsymbol{\varepsilon}_f$$

Protože musí platit $\varepsilon_f = \varepsilon_m$, je

$$\mathbf{\hat{O}}_f / \mathbf{\hat{O}}_m = \mathbf{E}_f / \mathbf{E}_m,$$

tzn. velikost napětí v jednotlivých složkách kompozitu odpovídá poměru jejich tuhostí (to platí pouze při stejných Poissonových číslech - součinitelích příčné kontrakce vlákna a matrice, tj. $\nu_f = \nu_m$).

V případě skleněného vlákna a matrice z plastu odpovídá poměr jejich modulů pružnosti ($E_f \approx 75000 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-2}$, $E \approx 2000$ až $3000 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-2}$) přibližně poměru jejich pevností ($\hat{O}_{TP} = 1\,500 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-2}$, $\hat{O}_{mP} = 40$ až $60 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-2}$). Proto jsou skleněná vlákna z mechanických hledisek pro plasty velice vhodným vyztužujícím materiálem. S ohledem na uvedený Hookeův zákon má pak rovnice rovnováhy sil tvar

$$\mathbf{\hat{O}}_{||} \cdot \mathbf{A} = (\mathbf{E}_f \cdot \mathbf{A}_f + \mathbf{E}_m \cdot \mathbf{A}_m) \cdot \boldsymbol{\varepsilon}_{||},$$

Vyjádříme-li - pomocí Hookeova zákona - napětí ve směru vlákna, které působí v elementu kompozitu, bude $\mathbf{\hat{O}}_{||} = \mathbf{E}_{||} \cdot \boldsymbol{\varepsilon}_{||}$,

$$\text{tedy platí } \mathbf{E}_{||} \cdot \boldsymbol{\varepsilon}_{||} \cdot \mathbf{A} = (\mathbf{E}_f \cdot \mathbf{A}_f + \mathbf{E}_m \cdot \mathbf{A}_m) \cdot \boldsymbol{\varepsilon}_{||},$$

kompozit složky

Pro poměrný objemový obsah vláken (podíl) platí

$$\Phi_f = V_f / V = A_f / A$$

kde je

V - celkový objem elementu kompozitu,

V_f - objem vlákna.

Modul pružnosti elementu kompozitu ve směru vláken lze pak vyjádřit vztahem

$$E_{||} = E_f \cdot A_f / A + (1 - A_f / A) = E_f \cdot \Phi_f + E_m \cdot (1 - \Phi_f) .$$

Objemový podíl matrice

$$1 - \Phi_f = V_m / V = A_m / A = A - A_f / A = \Phi_m$$

V praxi se snadněji stanoví hmotnostní podíl vláken (ψ^*). Pro objemový podíl vláken Φ_f platí

$$\Phi_f = 1 / (1 + 1 - \psi / \psi \cdot \rho_f / \rho_m)$$

kde je

$$\rho_f - \text{ hustota; podle použitých vláken} \quad \rho_{\text{sklo}} = 2,60 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3} ,$$

$$\rho_{\text{aramid}} = 1,45 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$$

$$\rho_{\text{uhlík}} = 1,80 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$$

Uložením paralelních vláken do matrice se dosáhne zvýšení její pevnosti ve směru vláken. Dojde-li k lomu vlákna, je zatížení přeneseno smykovými napětími na sousední vlákna a kompozit je schopen dále přenášet zatížení. Porušené vlákno se na přenosu zatížení nepodílí pouze v omezené části své délky (v okolí lomu), dochází k synergickému efektu, který je v další části kompozitu nenarušen. O tom, jak je tento synergický efekt silný, rozhoduje pevnost spojení obou složek. V případě, že neexistuje adheze mezi matricí a vláknem, nepřenáší se žádné zatížení z porušeného vlákna na sousední vlákno a pevnost laminátu odpovídá pevnosti rovingu. V případě, že smykově napětí na rozhraní složek překročí určitou hodnotu, vzniknou při lomu vlákna v matrici trhliny. Když tyto trhliny dosáhnou k sousednímu vlákně, dojde vlivem koncentrace napětí na čele trhliny k předčasnému porušení sousedního vlákna. V matrici vznikají další trhliny, které opět poškozují sousední vlákna, až dojde k poruše laminátu. Vysoká pevnost ve smyku (adheze)

tak může vést k vysokému smykovému napětí na konci vlákna, které způsobuje trhliny v matrici, a tím se snižuje pevnost laminátu. Potřeba mechanické energie pro odtržení vlákna od matrice je podstatně vyšší než energie potřebná ke vzniku trhlín v matrici. Z toho plyne, že pro vysoké pohlcení energie je nejpříznivější střední hodnota adheze *složek s nízkým smykovým napětím v místě trhlíny vlákna*. To se projevuje zvláště při rázových zatíženích. [3]

4 ZPRACOVÁNÍ – TECHNOLOGIE

4.1 Zpracování polotovarů

Vyztužené plasty se skládají z vláken jako vyztužujícího materiálu a z pryskyřic, příp. z termoplastů, jako pojiva neboli matrice. Jednotlivá vlákna nebo příze se zpracovávají na pramence, tkaniny a rohože.

Plošné hmotnosti - gramáže tkaniny jsou:

pro skleněná vlákna 25 až 900 g . m⁻² (u rohoží 225 až 450 g . m⁻²),

pro uhlíková vlákna 90 až 800 g . m⁻²,

pro aramidová vlákna 60 až 460 g . m⁻².

Reaktivní pryskyřice jsou složeny z nízkomolekulárních až oligomerních podílů, které se chemickou reakcí spojují na pevnou hmotu. To je podstatnou předností při smáčení a prosycování výztuže, která se většinou používá ve formě plochých polotovarů. Na druhé straně se při použití reaktivního polotovaru poměrně obtížně ovládá latentní chemická reakce. Při následném tvarování dochází k chemické reakci, při níž tyto pochody probíhají podle odlišných kritérií, a musí se tedy i různým způsobem optimalizovat.

Termoplasty jsou zcela polymerované makromolekulární látky, které se působením teploty roztaví, ve formě taveniny smáčí a prosytí výztuž a po ochladnutí ztuhnou jako polotovar. Jejich viskozita je všeobecně mnohonásobně vyšší než viskozita reaktivních pryskyřic ve výchozím stavu. Aby nedošlo k poškození hotových výrobků, používají se pro jejich snadnější vyjímání z formy separátory.

4.1.1 Polotovary s termosetickým pojivem

Nejčastěji používaná pojiva jsou nenasycené polyesterové (UP-R), vinylesterové (VE-R) a epoxidové pryskyřice (EP-R). Nenasycené polyesterové pryskyřice jsou rozpuštěny ve styrenu a vytvrzují se přidávkem iniciátorů (katalyzátoru) polymerací.

Iniciátory, kterými jsou většinou organické peroxidy, aktivují dvojně vazby pryskyřice. Volné vazby v molekule spolu vzájemně reagují a pomoci styrenových můstků vytvářejí trojrozměrnou síť. UP-R jsou tím reaktivnější, čím více obsahují polymerizovatelných dvojných vazeb, tzn. že reaktivita i hustota sítě se dají ovlivnit v širokém rozsahu. Množ-

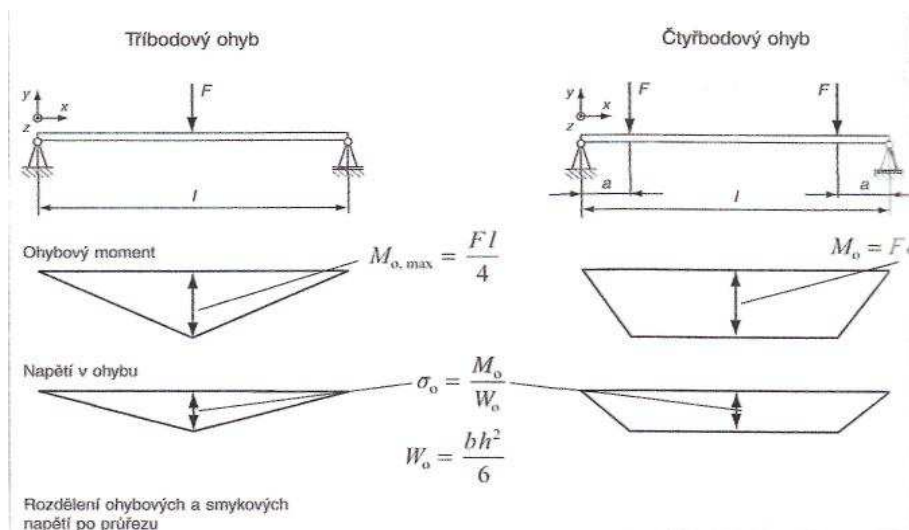
ství přidaného iniciátoru (organického peroxidu) lze řídit rychlost vytvrzování i jeho teplotní režim. Organické peroxidy se rozpadají za zvýšené teploty a tvoří volně radikály. Při vytvrzování za studena se musí rozpad peroxidů iniciovat pomocí urychlovačů. aby proces vytvrzování mohl začít.[3]

5 ZKOUŠKY MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ

5.1 Ohyb

Při stanovení elastických a pevnostních charakteristik zkouškou ohybem se předpokládá lineární rozdělení normálových 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 (obr. 6). Při zkoušce tříbodovým 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 žíní, např. ČSN EN ISO 14125



Obrázek 6 Průběh ohybových momentů při zkoušce tří- a čtyřbodovým ohybem

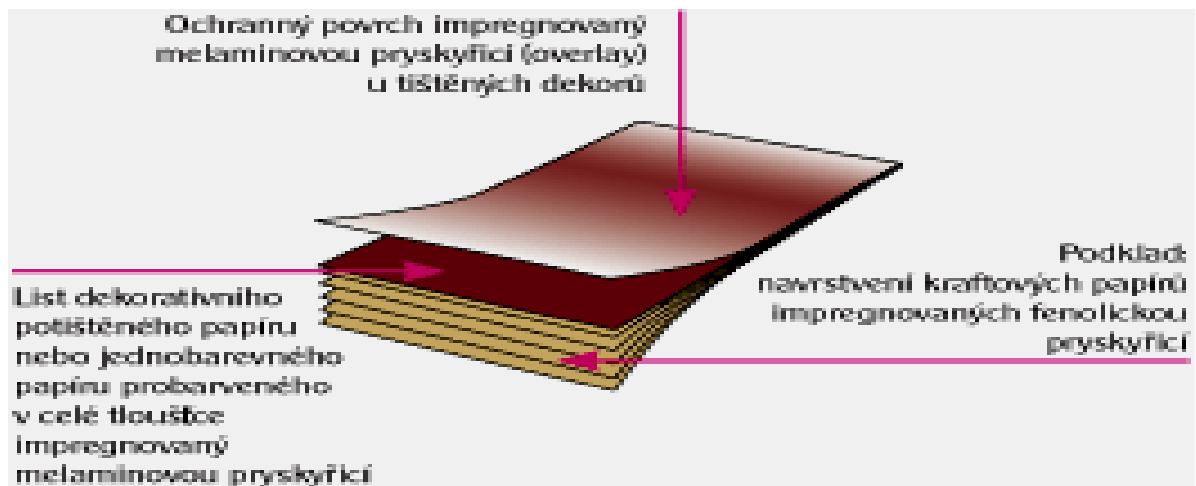
Měření je třeba provádět na dostatečně štíhlých vzorcích. S rostoucím štíhlostním poměrem (poměr rozteče podpor a tloušťky vzorku) až do úrovně rovné 10 výrazně stoupají naměřené hodnoty pevnosti a modulu pružnosti.[3]

II. PRAKTICKÁ ČÁST

6 STANOVENÍ CÍLE PRÁCE

Cílem bakalářské práce je experimentální studium mechanického ohybového chování HP kompozitů v různém prostředí a následné vyhodnocení zkoušek.

6.1 Struktura stěn



Obrázek 7 HPL, vysokotlaký laminát

Postup při testování materiálů

Ohybová zkouška je prováděna na přístroji Zwick 1456 (dle normy ČSN EN ISO 978) dle následujících dispozic:

- rychlost zkoušky: 10 mm/min
- vzdálenost podpor pro jednotlivé vzorky dle normy ČSN EN ISO 978 a konstrukčních možností
- zadání rozměrů každého vzorku dle hodnot naměřených posuvným měřidlem a mikrometrem
- vyhodnocení všech výsledků statisticky

Měření na přístroji Zwick 1456

Obrázek 8. Měřicí přístroj Zwick 1456

Přístroj použitý pro praktické testování vzorků tříbodovým ohybem měl tyto parametry: ZWICK AUGUST-NAGEL-STR. 11, D-89079 ULM, TYP 145665, WERK-NR 122480/93, AB-NR 321147, FNOM 20kN.

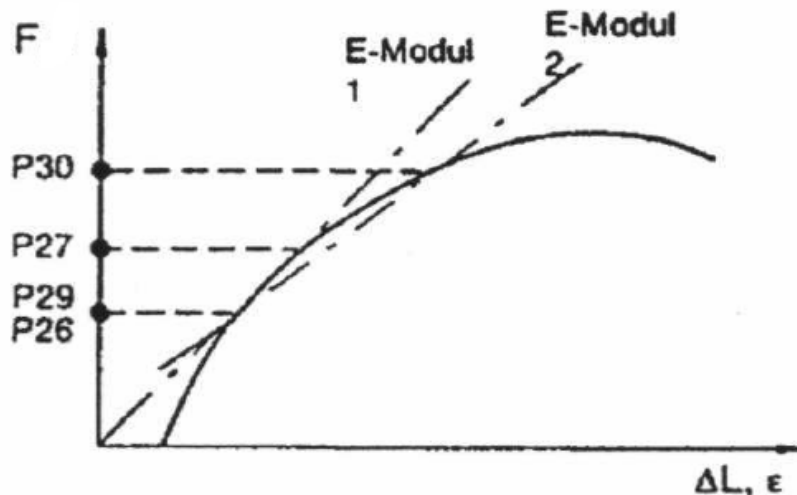
Univerzální program (dodávaný s přístrojem) pro zkoušky tahem, tlakem a ohybem je vhodný pro:

- zkoušky tahem a tlakem plastů, pěnových materiálů, textilu, vláknů zpevněných kompozitů, laminátů, tkaninových popruhů, papíru, lepenky, dřeva a dentálních materiálů
- zkoušky tahem a tlakem kovů (bez speciálního hodnocení plastických vlastností)
- zkoušky tří a čtyřbodovým ohybem (pro všechny typy materiálů)
- určení max. dvou elastických modulů

- nastavení a regulace teploty pro teplotní komory

Tento program není doporučen pro automatické systémy transportu vzorků.

Zkušební program 7092.105 je vhodný pro provádění zkoušek ve spojení s univerzálními zkušebními stroji Zwick řady 14xx. Program musí být instalován na osobních počítačích PC-IBM a kompatibilních. Určení modulu pružnosti je zřejmé z následujícího schématu na obr. 8.



Obrázek 9. Určení modulu pružnosti

kde: F ...síla

ΔL ...prodloužení (zkrácení)

P26 ... dolní limit určení E-modulu 1

P27 ... horní limit určení E-modulu 1

P29 ... dolní limit určení E-modulu 2

P30 ... horní limit určení E-modulu 2

ϵ ...poměrné prodloužení (poměrné zkrácení)

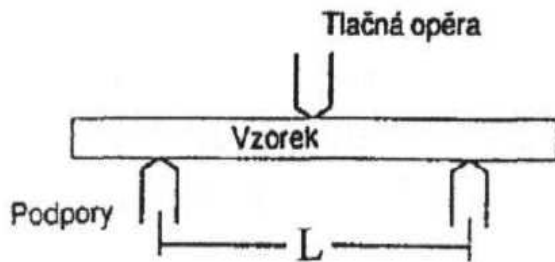
σ ...napětí

Těmito dvěma parametry (P26, P27 resp. P29, P30) je omezena oblast, z níž je určena hodnota modulu pružnosti E jako sečna procházející zvolenými body grafického záznamu průběhu zkoušky.[5]

6.1.1 Typy prováděných zkoušek

Zkouška ohybem

Nastavení podpěr při zkoušce je znázorněno na obr.9. Parametry zkoumaného vzorku ohybovou zkouškou musí dodržovat podmínky udané normou ČSN EN 978. Ta udává celkovou délku vzorku a vzdálenost podpěr vztažené na tloušťku laminátu. Rychlost zkoušky byla zvolena dle normy ČSN EN 978 na 10 mm/min.

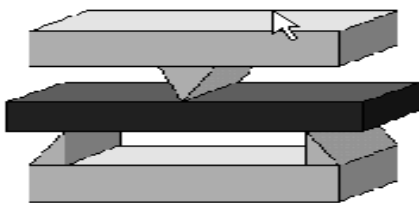


Obrázek 10. Princip podpěr při zkoušce ohybem

kde: L ...vzdálenost podpěr

Podmínky pro provádění ohybové zkoušky:

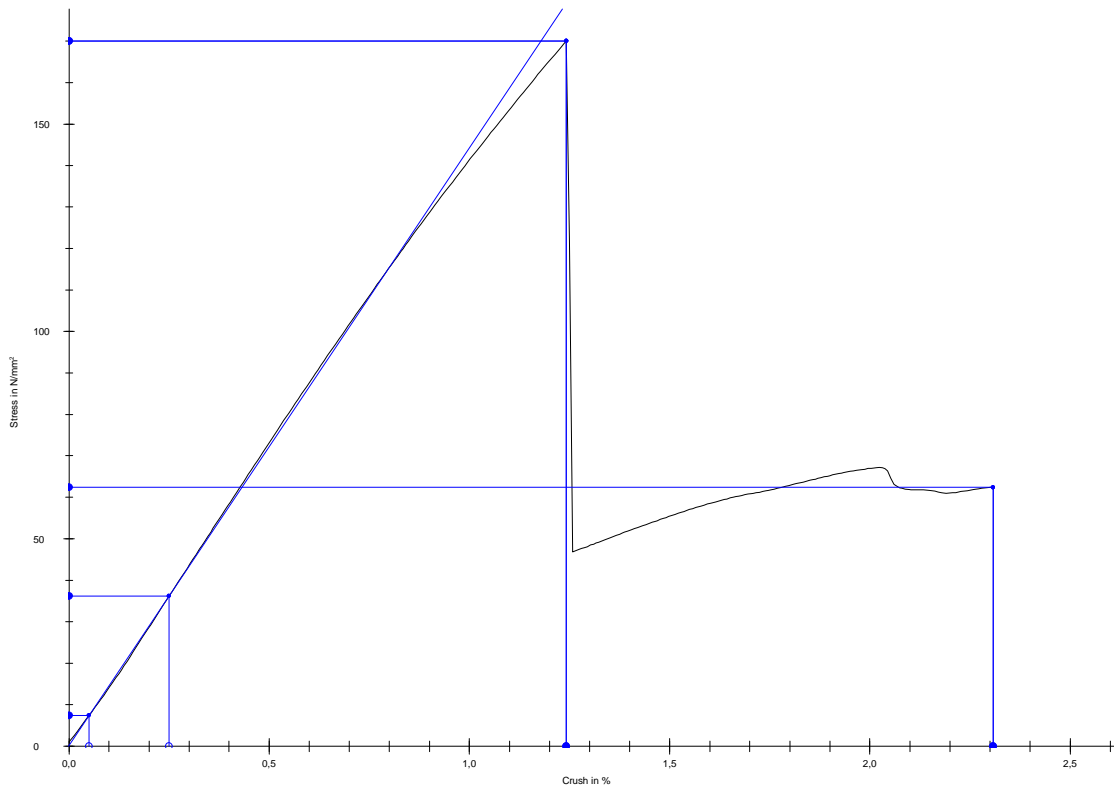
- Vzdálenost podpěr $L = (16 \pm 1) \cdot h$
- rychlost zkoušky $v = 1 \text{ mm/min}$
- tloušťka, šířka vzorku dle naměřených hodnot jednotlivého vzorku



Obrázek 11. Uchopení vzorku při ohybové zkoušce

7 ZKOUŠKY V OHYBU U HP KOMPOZITŮ

7.1 Mechanické zkoušky



Obrázek 12. Závislost typická pro všechny typy kompozitů

ZKOUŠKA OHYBEM

Přehled prováděných zkoušek v ohybu:

- příprava zkoušeného tělesa, vzorky byly nařezány na pásové byle ve směru L, T.

HP kompozity, $T=20\text{C}$

$v=10\text{mm/min}$, $L_p=64\text{mm}$, $r_{1,2}=5\text{mm}$

Tabulka 2 VZOREK Č.1 Výrobce - FUNDERMAX (Rakousko)

L-rakousko	a_0	B_0	σ_m	ε_{Fm}	σ_b	ε_{Break}	ΔL_{Break}	ΔL_{Fm}	E
n = 10	mm	mm	MPa	%	Mpa	%	mm	mm	MPa
x	4,082	20,07	156,21	1,10	83,66	1,74	2,90	1,84	14545,78
s	0,03011	0,07772	15,13	0,13	46,39	0,35	0,58	0,21	322,30
v	0,74	0,39	9,68	11,79	55,45	20,15	19,85	11,53	2,22
$P(\mu \leq) = 0,95$	4,104	20,13	167,02	1,19	116,82	1,99	3,32	1,99	14776,12
$P(\leq \mu) = 0,95$	4,06	20,02	145,40	1,01	50,51	1,49	2,49	1,68	14315,44

Kde: x-průměr, s-směrodatná odchylka, v-var. koef.

Tabulka 3 VZOREK Č.2 Výrobce – POLYREY (Francie)

L-Francie	a_0	b_0	σ_m	ε_{Fm}	σ_b	ε_{Break}	ΔL_{Break}	ΔL_{Fm}	E
n = 10	mm	mm	MPa	%	Mpa	%	mm	mm	MPa
x	4,05	19,57	197,35	1,41	128,77	1,80	3,03	2,38	15453,09
s	0,04989	0,1828	6,68	0,05	74,21	0,43	0,73	0,08	566,31
v	1,23	0,93	3,39	3,30	57,63	23,77	24,24	3,27	3,66
$P(\mu \leq) = 0,95$	4,086	19,7	202,12	1,44	181,80	2,10	3,55	2,44	15857,82
$P(\leq \mu) = 0,95$	4,014	19,44	192,57	1,38	75,73	1,49	2,50	2,32	15048,37

Kde: x-průměr, s-směrodatná odchylka, v-var. koef.

Tabulka 4 VZOREK Č.3 Výrobce ABET (Itálie)

L-Itálie	a_0	b_0	σ_m	ε_{Fm}	σ_b	ε_{Break}	ΔL_{Break}	ΔL_{Fm}	E
n = 10	mm	mm	MPa	%	Mpa	%	mm	mm	MPa
x	3,969	20,19	181,89	1,28	131,86	1,77	3,04	2,20	15751,17
s	0,01663	0,06118	4,98	0,06	64,61	0,69	1,17	0,10	353,43
v	0,42	0,30	2,74	4,52	49,00	38,82	38,55	4,71	2,24
$P(\mu \leq) = 0,95$	3,981	20,23	185,45	1,32	178,03	2,26	3,87	2,27	16003,76
$P(\leq \mu) = 0,95$	3,957	20,15	178,34	1,24	85,69	1,28	2,20	2,13	15498,58

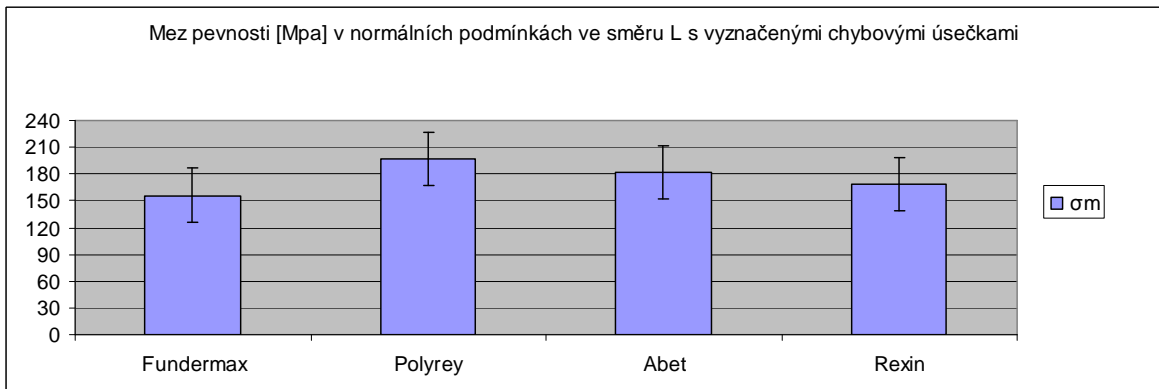
Kde: x-průměr, s-směrodatná odchylka, v-var. koef.

Tabulka 5 VZOREK Č.4 Výrobce Rexin (China)

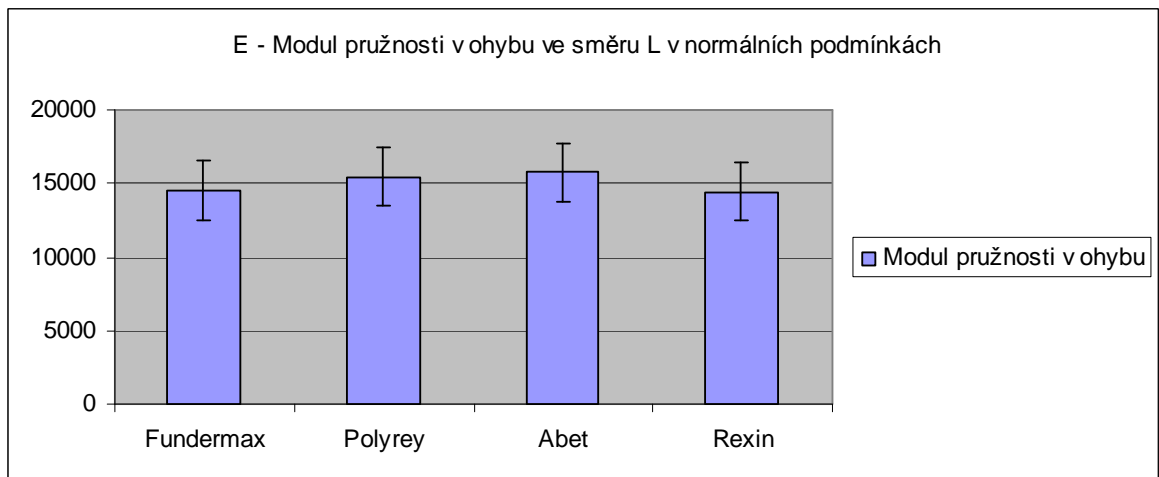
L-china	a_0	b_0	σ_m	ε_{Fm}	σ_b	ε_{Break}	ΔL_{Break}	ΔL_{Fm}	E
n = 10	mm	mm	MPa	%	Mpa	%	mm	mm	MPa
x	3,768	20,15	168,38	1,22	167,55	1,22	2,23	2,23	14431,18
s	0,136	0,04945	18,89	0,16	18,97	0,16	0,33	0,33	563,59
v	3,61	0,25	11,22	12,93	11,32	12,92	14,74	14,74	3,91
$P(\mu \leq) = 0,95$	3,865	20,19	181,88	1,34	181,11	1,34	2,47	2,46	14833,96
$P(\leq \mu) = 0,95$	3,671	20,12	154,88	1,11	154,00	1,11	2,00	2,00	14028,40

Kde: x-průměr, s-směrodatná odchylka, v-var. koef.

Graf výsledků naměřených hodnot ve směru L.



Obrázek 13. σ_m –Mez pevnosti [MPa] ve směru T, tabulek 2.-5.



Obrázek 14. E – Modul pružnosti v ohybu ve směru L , tabulky 2-5.

Tabulka 6 VZOREK Č.1 Výrobce - FUNDERMAX (Rakosko)

T-Rakousko	a ₀	b ₀	σ _m	ε _{Fm}	σ _b	ε _{Break}	Δ L _{Break}	Δ L _{Fm}	E
n = 10	mm	mm	MPa	%	Mpa	%	mm	mm	MPa
x	4,07	20,19	116,28	1,06	116,23	1,07	1,79	1,78	11001,73
s	0,01826	0,04007	12,17	0,12	12,25	0,11	0,19	0,20	189,65
v	0,45	0,20	10,47	11,12	10,54	10,49	10,55	11,18	1,72
P(μ ≤) = 0,95	4,083	20,21	124,98	1,15	124,99	1,15	1,92	1,92	11137,27
P(≤ μ) = 0,95	4,057	20,16	107,58	0,98	107,48	0,99	1,65	1,64	10866,19

Kde: x-průměr, s-směrodatná odchylka, v-var. koef.

Tabulka 7 VZOREK Č.2 Výrobce – POLYREY (Francie)

T-francie	a ₀	b ₀	σ _m	ε _{Fm}	σ _b	ε _{Break}	Δ L _{Break}	Δ L _{Fm}	E
n = 10	mm	mm	MPa	%	Mpa	%	mm	mm	MPa
x	4,014	19,7	145,12	1,28	135,10	1,32	2,24	2,19	11724,85
s	0,06899	0,08796	7,31	0,06	34,64	0,10	0,18	0,12	313,32
v	1,72	0,45	5,04	4,44	25,64	7,95	7,92	5,67	2,67
P(μ ≤) = 0,95	4,063	19,77	150,35	1,32	159,86	1,39	2,37	2,27	11948,77
P(≤ μ) = 0,95	3,965	19,64	139,89	1,24	110,34	1,24	2,12	2,10	11500,93

Kde: x-průměr, s-směrodatná odchylka, v-var. koef.

Tabulka 8 VZOREK Č.3 Výrobce ABET (Itálie)

T-Italie	a ₀	b ₀	σ _m	ε _{Fm}	σ _b	ε _{Break}	Δ L _{Break}	Δ L _{Fm}	E
n = 10	mm	mm	MPa	%	Mpa	%	mm	mm	MPa
x	3,952	20,25	135,74	1,24	135,37	1,25	2,15	2,15	11662,90
s	0,01932	0,1274	3,97	0,05	3,86	0,05	0,08	0,08	240,18
v	0,49	0,63	2,93	3,86	2,85	3,81	3,64	3,71	2,06
P(μ ≤) = 0,95	3,966	20,34	138,58	1,28	138,13	1,28	2,21	2,20	11834,56
P(≤ μ) = 0,95	3,938	20,16	132,90	1,21	132,61	1,21	2,10	2,09	11491,25

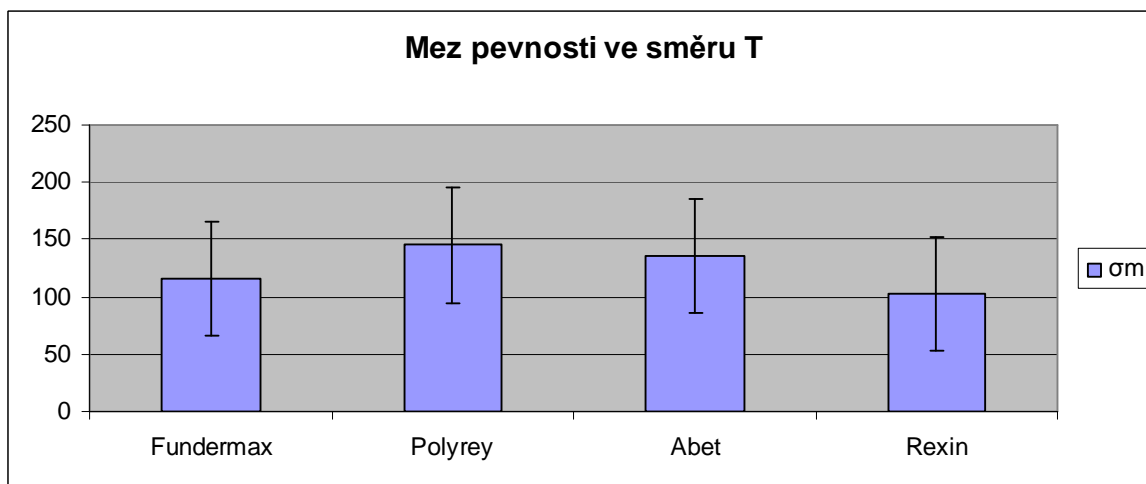
Kde: x-průměr, s-směrodatná odchylka, v-var. koef.

Tabulka 9 VZOREK Č.4 Výrobce Rexin (China)

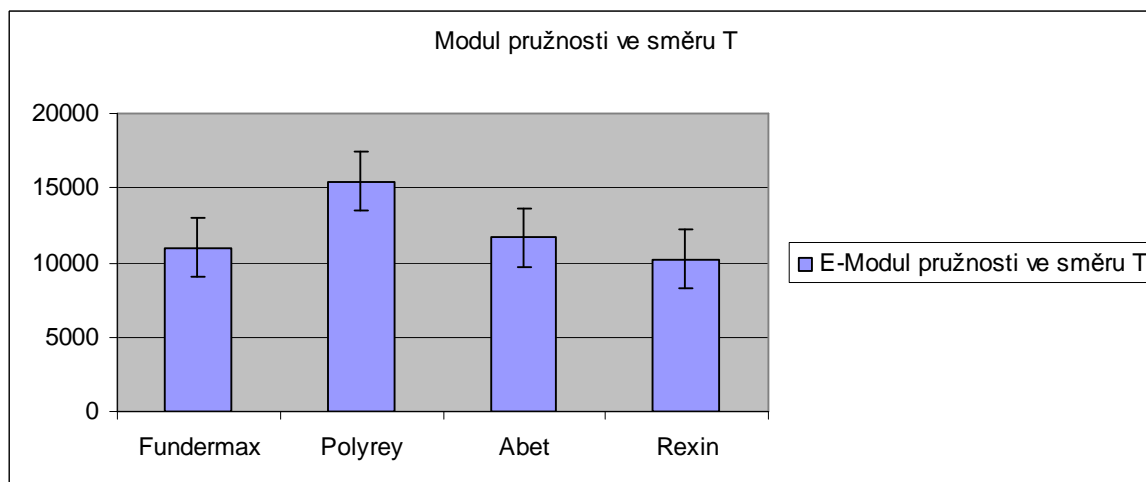
L-china	a ₀	b ₀	R _m	ε _{Fm}	R _b	ε _{Break}	Δ L _{Break}	Δ L _{Fm}	E
n = 10	mm	mm	MPa	%	Mpa	%	mm	mm	MPa
x	4,005	20,02	106,23	1,28	105,72	1,28	2,19	2,19	9123,28
s	0,1133	0,027	3,64	0,09	3,84	0,09	0,12	0,12	372,27
v	2,83	0,13	3,43	6,95	3,63	6,94	5,65	5,69	4,08

L-china	a_0	b_0	R_m	ϵ_{Fm}	R_b	ϵ_{Break}	ΔL_{Break}	ΔL_{Fm}	E
n = 10	mm	mm	MPa	%	Mpa	%	mm	mm	MPa
$P(\mu \leq) = 0,95$	4,086	20,04	108,83	1,35	108,46	1,35	2,28	2,28	9389,33
$P(\leq \mu) = 0,95$	3,924	20	103,63	1,22	102,98	1,22	2,10	2,10	8857,22

Kde: \bar{x} -průměr, s -směrodatná odchylka, v -var. koef.



Obrázek 15. σ_m - Mez pevnosti [MPa] ve směru L, tabulek 6.-9.



Obrázek 16. Hodnota E modulu pružnosti ve směru T, tabulky 6.-9.

Tabulka 10 Shrnutí výsledků po předpokládaném seřazení (směry L, T):

OHYB ve směru L,T	σ_{P+-S}	E+-S.chyba
L– Fundermax (Rakousko)	156+-4,7	14546+-102
T	116+-3,8	11000+-60,1
L – Polyrey (Francie)	197+-2,2	15453+-179
T	145+-2,2	11725+-99
L – Abet (Itálie)	182+-1,6	15751+-112
T	136+-1,27	11663+-76
L – Rexim (China)	168+-6	14431+-178
T	106,23	10229,77

ZKOUŠKA OHYBEM

HP kompozity , T=20C°, 1500h ve vodě

v=10mm/min, Lp=64mm, r_{1,2}=5mm

Všechny naměřené hodnoty:

Statistické vyhodnocení:

Tabulka 11 VZOREK Č.1 Výrobce - FUNDERMAX (Rakousko)

T-Rakousko	a ₀	b ₀	σ_m	ϵ_{Fm}	σ_b	ϵ_{Break}	ΔL_{Break}	ΔL_{Fm}	E
n = 10	mm	mm	MPa	%	Mpa	%	mm	mm	MPa
x	4,152	20,15	99,15	1,05	42,85	2,37	3,90	1,72	9954,08
s	0,03011	0,02003	10,84	0,11	38,69	1,04	1,71	0,18	199,29
v	0,73	0,10	10,94	10,34	90,29	43,66	43,85	10,57	2,00
P($\mu \leq$) = 0,95	4,174	20,16	106,91	1,12	70,50	3,11	5,13	1,85	10096,51
P($\leq \mu$) = 0,95	4,13	20,13	91,40	0,97	15,20	1,63	2,68	1,59	9811,65

Kde: x-průměr, s-směrodatná odchylka, v-var. koef.

Tabulka 12 VZOREK Č.2 Výrobce – POLYREY (Francie)

T-Francie	a_0	b_0	σ_m	ε_{Fm}	σ_b	ε_{Break}	ΔL_{Break}	ΔL_{Fm}	E
n = 10	mm	mm	MPa	%	Mpa	%	mm	mm	MPa
x	4,149	19,8	119,60	1,33	83,68	1,61	2,66	2,19	10418,22
s	0,05425	0,09177	3,31	0,07	47,19	0,35	0,58	0,13	202,79
v	1,31	0,46	2,77	5,28	56,40	21,76	21,90	6,02	1,95
$P(\mu \leq) = 0,95$	4,188	19,87	121,97	1,38	117,41	1,86	3,07	2,28	10563,16
$P(\leq \mu) = 0,95$	4,11	19,73	117,23	1,28	49,95	1,36	2,24	2,10	10273,29

Kde: x-průměr, s-směrodatná odchylka, v-var. koef.

Tabulka 13 VZOREK Č.3 Výrobce ABET (Itálie)

T-itálie	a_0	b_0	σ_m	ε_{Fm}	σ_b	ε_{Break}	ΔL_{Break}	ΔL_{Fm}	E
n = 9	mm	mm	MPa	%	Mpa	%	mm	mm	MPa
x	4,042	20,21	127,25	1,41	115,84	1,55	2,61	2,39	10705,24
s	0,02333	0,05711	3,76	0,06	32,14	0,37	0,62	0,11	149,70
v	0,58	0,28	2,96	4,52	27,75	23,67	23,85	4,50	1,40
$P(\mu \leq) = 0,95$	4,06	20,25	130,15	1,46	140,59	1,83	3,09	2,47	10820,50
$P(\leq \mu) = 0,95$	4,024	20,16	124,36	1,36	91,09	1,26	2,13	2,30	10589,97

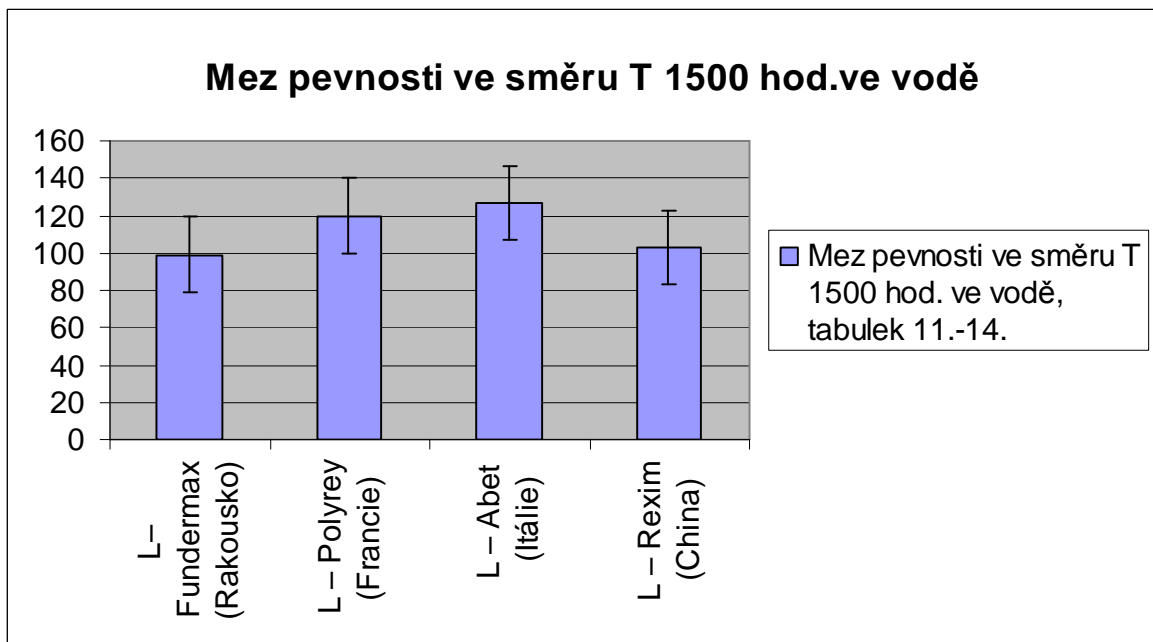
Kde: x-průměr, s-směrodatná odchylka, v-var. koef.

Tabulka 14 VZOREK Č.4 Výrobce Rexin (China)

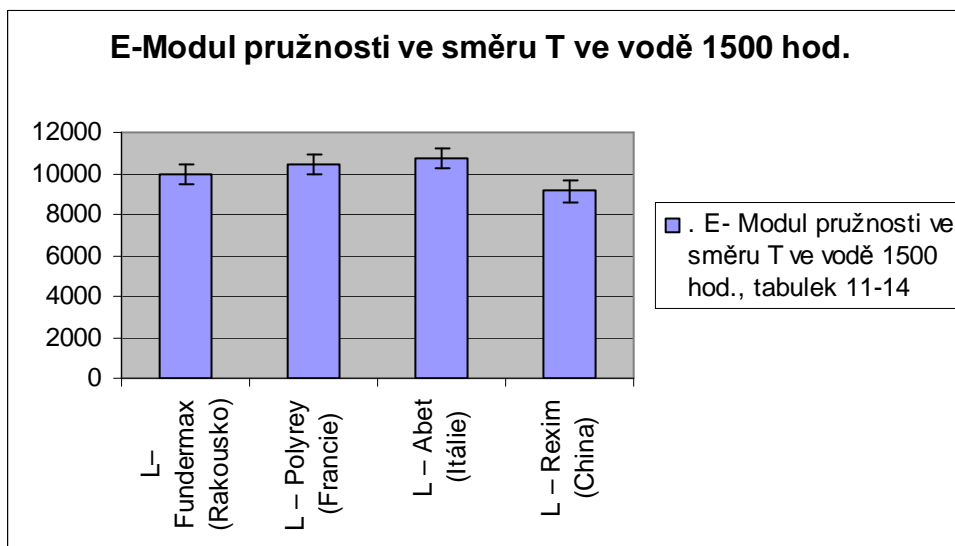
T-china	a_0	b_0	σ_m	ε_{Fm}	Rb	ε_{Break}	ΔL_{Break}	ΔL_{Fm}	E
n = 10	mm	mm	MPa	%	Mpa	%	mm	mm	MPa
x	3,906	20,02	102,88	0,99	102,55	0,99	1,74	1,73	10229,77
s	0,0943	0,05329	5,02	0,07	5,38	0,06	0,11	0,11	607,02
v	2,41	0,27	4,88	6,59	5,25	6,49	6,32	6,41	5,93
$P(\mu \leq) = 0,95$	3,973	20,06	106,47	1,04	106,39	1,04	1,81	1,81	10663,60

T-china	a_0	b_0	σ_m	ε_{Fm}	Rb	ε_{Break}	ΔL_{Break}	ΔL_{Fm}	E
n = 10	mm	mm	MPa	%	Mpa	%	mm	mm	MPa
$P(\leq \mu) = 0,95$	3,839	19,98	99,30	0,95	98,70	0,95	1,66	1,66	9795,95

Kde: \bar{x} -průměr, s-směrodatná odchylka, v-var. koef.



Obrázek 17. Mez pevnosti ve směru T 1500 hod. ve vodě, tabulek 11.-14.



Obrázek 18. E- Modul pružnosti ve směru T ve vodě 1500 hod., tabulek 11-14

Tabulka 15 VZOREK Č.1 Výrobce - FUNDERMAX (Rakousko)

L-rakousko	a_0	b_0	σ_m	ϵ_{Fm}	σ_b	ϵ_{Break}	ΔL_{Break}	ΔL_{Fm}	E
n = 10	mm	mm	MPa	%	Mpa	%	mm	mm	MPa
x	4,181	20,04	145,00	1,17	50,41	2,15	3,51	1,92	13486,22
s	0,04886	0,04836	9,69	0,09	13,85	0,35	0,57	0,15	358,59
v	1,17	0,24	6,68	7,73	27,48	16,31	16,26	7,57	2,66
$P(\mu \leq) = 0,95$	4,216	20,07	151,92	1,24	60,31	2,40	3,92	2,02	13742,49
$P(\leq \mu) = 0,95$	4,146	20	138,07	1,11	40,51	1,90	3,10	1,81	13229,95

Kde: x-průměr, s-směrodatná odchylka, v-var. koef.

Tabulka 16 VZOREK Č.2 Výrobce – POLYREY (Francie)

L-Francie	a_0	b_0	σ_m	ϵ_{Fm}	σ_b	ϵ_{Break}	ΔL_{Break}	ΔL_{Fm}	E
n = 10	mm	mm	MPa	%	Mpa	%	mm	mm	MPa
x	4,11	19,62	172,26	1,43	58,53	2,39	3,96	2,38	14219,23
s	0,05888	0,1187	5,91	0,03	42,91	0,49	0,79	0,07	347,53
v	1,43	0,60	3,43	2,41	73,31	20,59	20,03	3,08	2,44
$P(\mu \leq) = 0,95$	4,152	19,71	176,48	1,46	89,20	2,74	4,53	2,43	14467,60
$P(\leq \mu) = 0,95$	4,068	19,54	168,04	1,41	27,86	2,04	3,40	2,33	13970,86

Kde: x-průměr, s-směrodatná odchylka, v-var. koef.

Tabulka 17 VZOREK Č.3 Výrobce ABET (Itálie)

L- Itálie	a_0	b_0	σ_m	ϵ_{Fm}	σ_b	ϵ_{Break}	ΔL_{Break}	ΔL_{Fm}	E
n = 10	mm	mm	MPa	%	Mpa	%	mm	mm	MPa
x	4,008	20,3	164,49	1,32	86,68	2,17	3,71	2,26	14455,17
s	0,027	0,06806	3,77	0,04	53,62	0,79	1,37	0,08	275,81
v	0,67	0,34	2,29	3,15	61,85	36,56	37,02	3,34	1,91
$P(\mu \leq) = 0,95$	4,027	20,35	167,19	1,35	125,00	2,74	4,69	2,31	14652,28

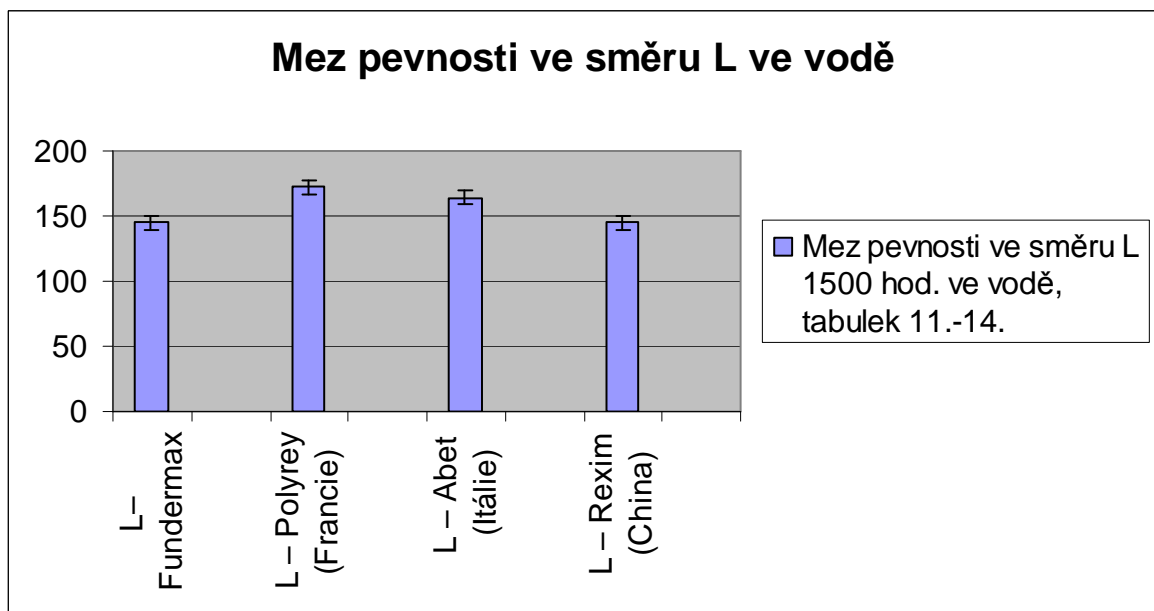
L- Itálie	a ₀	b ₀	σ _m	ε _{Fm}	σ _b	ε _{Break}	Δ L _{Break} ak	Δ L _{Fm}	E
n = 10	mm	mm	MPa	%	Mpa	%	mm	mm	MPa
P(≤ μ) = 0,95	3,989	20,25	161,79	1,29	48,36	1,61	2,73	2,20	14258,05

Kde: x-průměr, s-směrodatná odchylka, v-var. koef.

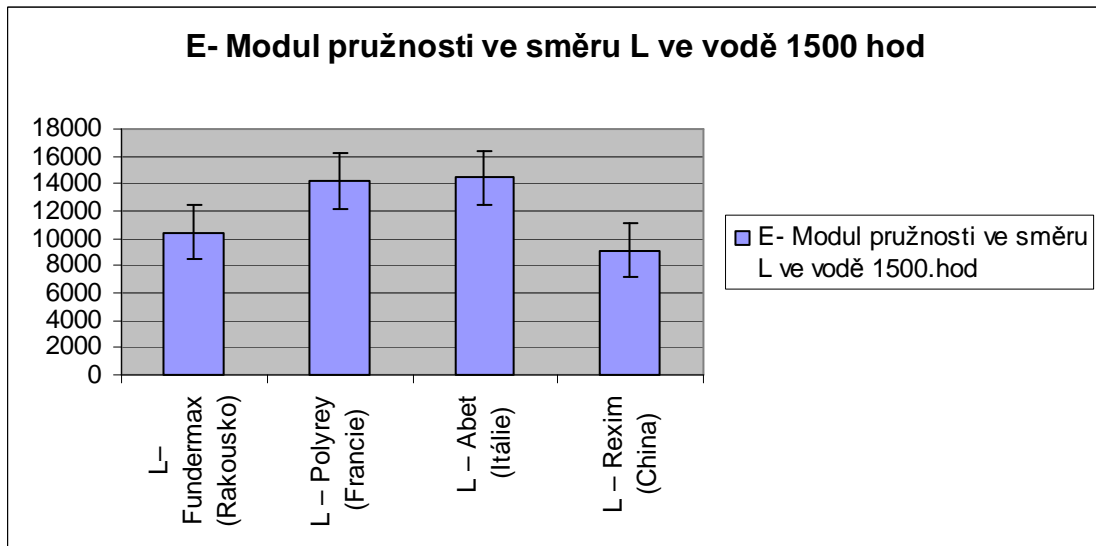
Tabulka 18 VZOREK Č.4 Výrobce Rexin (China)

L-China	a ₀	b ₀	σ _m	ε _{Fm}	σ _b	ε _{Break}	Δ L _{Break} ak	Δ L _{Fm}	E
n = 10	mm	mm	MPa	%	Mpa	%	mm	mm	MPa
x	3,842	20,16	147,97	1,42	147,97	1,42	2,52	2,52	11972,98
s	0,1173	0,02163	6,01	0,07	6,01	0,07	0,16	0,16	160,77
v	3,05	0,11	4,06	4,97	4,06	4,97	6,17	6,17	1,34
P(μ ≤) = 0,95	3,926	20,17	152,26	1,47	152,26	1,47	2,63	2,63	12087,88
P(≤ μ) = 0,95	3,758	20,14	143,67	1,36	143,67	1,36	2,41	2,41	11858,08

Kde: x-průměr, s-směrodatná odchylka, v-var. koef.



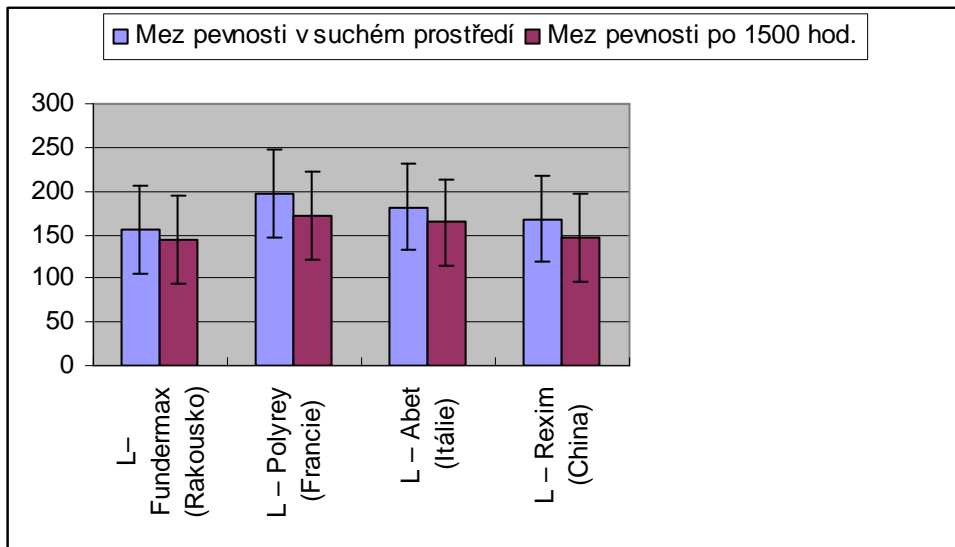
Obrázek 19. Mez pevnosti ve směru L ve vodě 1500. hod., tabulek 15-18



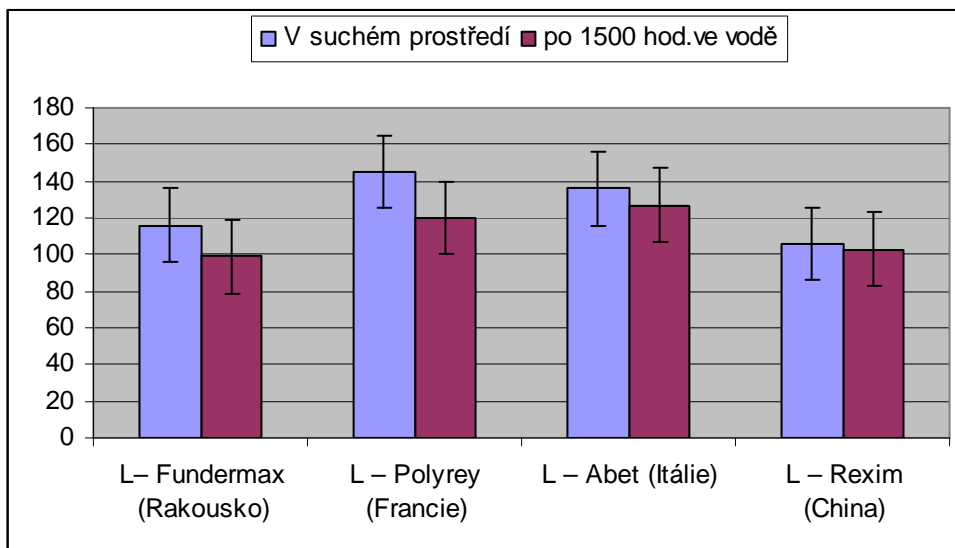
Obrázek 20. E- Modul pružnosti ve směru L ve vodě 1500.hod., tabulek 15-18

Tabulka 19 Shrnutí výsledků po 1500h ve vodě

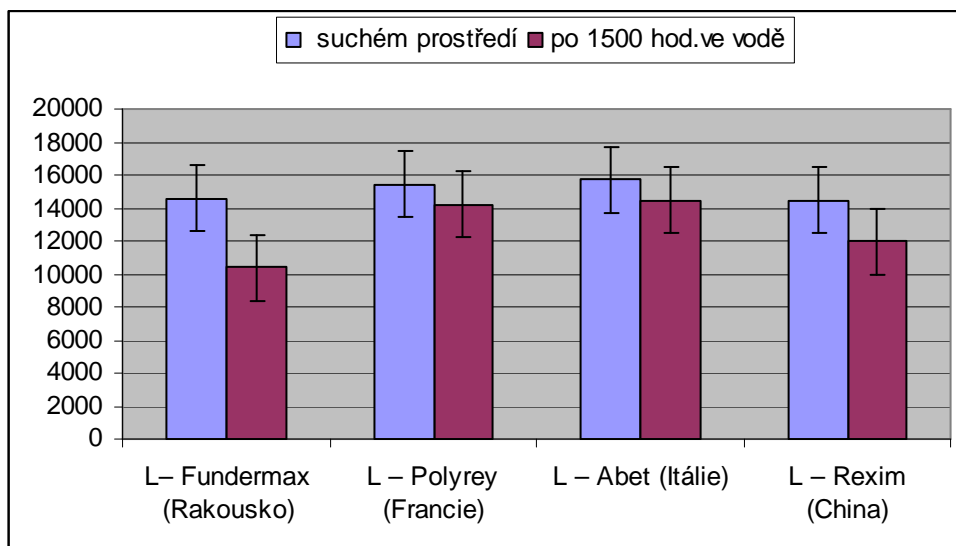
OHYB ve směru L,T	σ_p – mez pevnosti	E- modul pružnosti
L – Fundermax (Rakousko)	145,00	10418,22
T	99,15	9954,08
L – Polyrey (Francie)	172,26	14219,23
T	119,60	10418,22
L – Abet (Itálie)	164,49	14455,17
T	127,25	10705,24
L – Rexim (China)	147,97	11972,98
T	102,88	9123,28



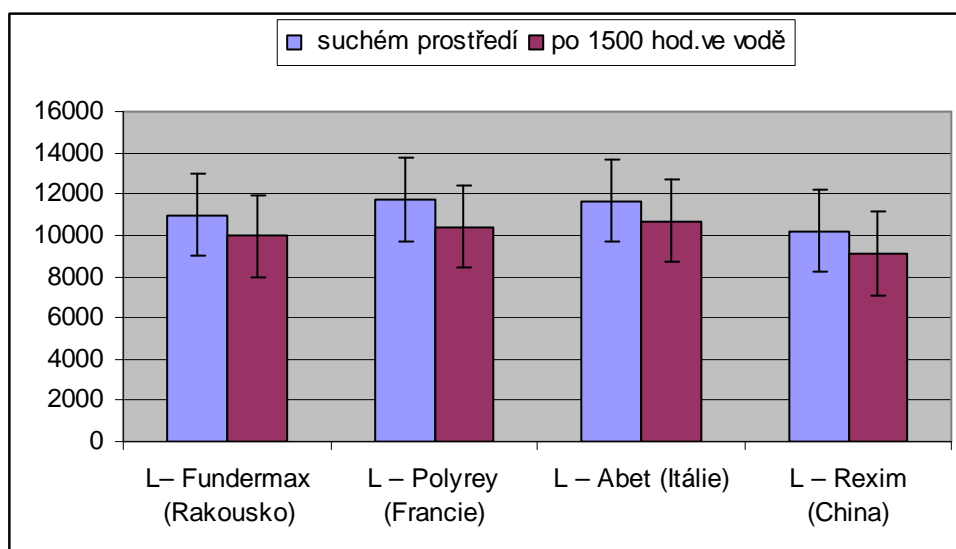
Obrázek 21. Srovnání hodnot v suchém stavu a po pobytu 1500 hod ve vodě Rm – Mez pevnosti ve směru L srovnán, tabulky 10,19



Obrázek 22. Srovnání hodnot v suchém stavu a po pobytu 1500 hod. ve vodě Rm – Mez pevnosti ve směru T, tabulky 10, 19



Obrázek 23. Porovnání E – modul pružnosti v suchém prostředí a 1500 hod. ve vodě, ve směru L, tabulky 10, 19



Obrázek 24. Porovnání E-modul pružnosti v suchém prostředí a 1500 hod. ve vodě ve směru T.

7.2 Stanovení součinitele β dle normy ČSN EN 978

Pro stanovení součinitele β vycházím z normy ČSN EN 978 Pod – Stanovení součinitele β .

Součinitel β : poměr mezi tuhostí HP kompozitu po skladování ve vodě a teplotě 20 °C po dobu 1500 hodin a počáteční tuhostí HP kompozitu stanovenou v suchých podmínkách při teplotě 20 °C pro dodané vzorky.

Postup zkoušky

- Použije se deset zkušebních těles pro které byla stanovena počáteční tuhost.
- Pro každý zkušební těleso se stanoví nosníková tuhost (S_1) v $N.mm^2$.
- Zkušební těleso se vystaví působení vody o teplotě $(20 \pm 2) ^\circ C$ po dobu 1500 hodin. Po této době se zkušební těleso osuší.
- Pro každý zkušební těleso se stanoví nosníková tuhost (S_2) v $N.mm^{-2}$.
- Pro každý zkušební těleso se vypočte součinitel β s použitím vztahu:

$$\beta = S_2/S_1, \text{ kde}$$

S_1 je nosníková tuhost po vytvrzení v $N.mm^{-2}$;

S_2 je kompozitu tuhost po 1500 h ve vodě teplé $20 ^\circ C$ v $N.mm^{-2}$. Vypočte se průměrná hodnota součinitele β pro dvě tělesa ze stejného vzorku.

Stanovení koeficientu β pro testovaný HP kompozit

Při stanovování koeficientu β , jsme nebyli schopni dodržet přesné znění normy ČSN EN 978. Norma požaduje exponovat vzorky ve vodě po dobu 1000 hodin, naše vzorky byly exponovány ve vodě po dobu 1500hodin. Proto si volíme modifikovaný koeficient β^* .

Stanovení součinitele β^* :

Vztah pro stanovení β^* :

$$\beta^* = E_2/E_1 \quad (1)$$

E_1 – modul pružnosti v ohybu pro Etalon : 10 mm – Tabulka 10

E_2 - modul pružnosti v ohybu pro 1500 hodin ve vodě:10 mm –

Tabulka 20 Stanovení koeficientu $\beta^* L$

VÝROBCE ZEMĚ PŮVODU	Ohyb – Etalon (E_1) [MPa]	Ohyb – 1500 hodin ve vodě(E_2) [MPa]	β^*
FUNDERMAX (Rakousko)	14546	13486	0,93
POLYREY (Francie)	15453	14219	0,92
ABET (Itálie)	15751	14455	0,92
Rexin (China)	14431	11973	0,83

Tabulka 21 Stanovení koeficientu β^* ve směru T

VÝROBCE ZEMĚ PŮVODU	Ohyb – Etalon (E_1) [MPa]	Ohyb – 1500 hodin ve vodě(E_2) [MPa]	β^*
FUNDERMAX (Rakousko)	11000	9954	0,90
POLYREY (Francie)	11725	10418	0,88
ABET (Itálie)	11663	10705	0,91
Rexin (China)	10230	9123	0,89

ZÁVĚR

Úkolem bakalářské práce bylo zjistit chování HP kompozitních materiálů v různých prostředích. Provedli jsme ohybové zkoušky v normálním prostředí a po pobytu materiálů 1500 hodin ve vodě. Souhrn statisticky měření, porovnání naměřených hodnot, modulů pružnosti a mezí pevnosti, mechanických zkoušek je v části 7.1. Stanovení součinitele β jsme se zabývali v části 7.1.1. Po námi provedených měřeních můžeme konstatovat, že chování těchto materiálů je značně ovlivněno směrem řezu materiálu (L,T), které jsou různé jak po vyhodnocení mezí pevnosti (σ_P), tak u porovnání modulu pružnosti (E). Největší rozdíly mezi suchým a mokřím prostředím vykazoval materiál Rexim (China). U ostatních třech zkoušených výrobců jsou odlišnosti mezi prostředím a u meze pevnosti a modulu pružnosti nižší. V závěrečném hodnocení můžeme konstatovat že HP kompozitní materiály jsou po námi provedených zkouškách vhodné pro použití ve vlhkém prostředí a jsou schopny velmi dobře odolávat vodě.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] Bhangwan D. Agarwal, Lawrence J.Broutman : Vláknové kompozity SNTL Praha 1987
- [2] Doc. Ing. Oldřich Šuba: Dimenzování a navrhování výrobků z plastu, VUT v Čs.
Redakci VN MON, 2005 ISBN 80-7318-287-
- [3] Gottfrid W.Ehrenstein: Polymerní kompozitní materiály nakladatelství, SCIENTIA
spol.sr.o. Praha 2009, ISBN 978-80-86960-29-6
- [4] Zwick PC software 7092.105 (manual), 1992
- [5] Šternschuss, A.- Zvonař, V. – Slezák, O. – Kučera, M.: Polyesterové skelné lamináty,
SNTL, 1961
- [6] Möckel, J., Fuhrmann, U.: Epoxidharze, Bd. 51 Verlag Moderne Industrie, Landsberg,
1990

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

[L]	-	směr ohybu (tabulky)
[T]	-	směr ohybu (tabulky)
φ	%	objemový podíl
[S]	-	matice tuhosti
[σ_P]	MPa	mez pevnosti v tabulkách
[ε]	-	tenzor deformace
a_0	mm	střední tloušťka
b_0	mm	střední šířka
D	mm	průměr
E	MPa	modul pružnosti v ohybu
E^-	MPa	modul pružnosti v tlaku
e.	mm	vzdálenost od neutrální osy
		kolmo ke směru vláken, osnovy, tváření
⊥		rovnoběžně se směrem vláken, útku, tváření
e_+	mm	vzdálenost od neutrální osy
E_O	MPa	modul pružnosti v ohybu
F	N	síla
F_{max}	N	maximální síla při které došlo k porušení materiálu
h	mm	délka (výška)
L_p	mm	podpěrná délka
P26	MPa	dolní limit určení E - modulu 1
P27	MPa	horní limit určení E - modulu 1
P29	MPa	dolní limit určení E - modulu 2
P30	MPa	horní limit určení E - modulu 2

s	-	směrodatná odchylka
S_1	-	nosníková tuhost
S_2	-	nosníková tuhost
v	mm/min	rychlost
x	-	aritmetický průměr – v tabulkách
x,y,z	-	označení os souřadného systému
y	mm	průhyb
α	-	součinitel
β	-	součinitel
β^*	-	modifikovaný součinitel
ΔL	mm	prodloužení na délce
ϵ_{ext}	%	protažení na extenzometru
ϵ_{ext}	mm	protažení na extenzometru
ϵ_{Pkr}	%	prodloužení při kritickém napětí
ν	-	Poissonovo číslo
σ	MPa	napětí
σ^-	MPa	kritické napětí v tlaku
σ_+	MPa	kritické napětí v tahu
σ_O	MPa	kritické napětí v ohybu
σ_{Pkr}	MPa	kritické napětí, mez pevnosti
σ_x	MPa	napětí normálové ve směru x
σ_z	MPa	napětí normálové ve směru z
τ_{xz}	MPa	napětí smykové v rovině xz

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1 Výroba textilních skleněných vláken tažením s trysek.....	12
Obrázek 2 . Nejdůležitější typy sklovláknitých výztuží	13
Obrázek 3 Schéma výroby uhlíkových PAN - vláken	17
Obrázek 4 Základní elastické charakteristiky jednosměrně vyztužené vrstvy.	19
Obrázek 5 Model elementárního vlákna uloženého v matrici	28
Obrázek 6 Průběh ohybových momentů při zkoušce tří- a čtyřbodovým ohybem	34
Obrázek 7 HPL, vysokotlaký laminát	36
Obrázek 8. Měřicí přístroj Zwick 1456.....	37
Obrázek 9. Určení modulu pružnosti	38
Obrázek 10. Princip podpěr při zkoušce ohybem	39
Obrázek 11. Uchopení vzorku při ohybové zkoušce	39
Obrázek 12. Závislost typická pro všechny typy kompozitů	40
Obrázek 13. σ_m –Mez pevnosti [MPa] ve směru T, tabulek 2.-5.	43
Obrázek 14. E – Modul pružnosti v ohybu ve směru L , tabulky 2-5.....	43
Obrázek 15. σ_m - Mez pevnosti [MPa] ve směru L, tabulek 6.-9.....	45
Obrázek 16. Hodnota E modulu pružnosti ve směru T, tabulky 6.-9.	45
Obrázek 17. Mez pevnosti ve směru T 1500 hod. ve vodě, tabulek 11.-14.....	48
Obrázek 18. E- Modul pružnosti ve směru T ve vodě 1500 hod., tabulek 11-14.....	48
Obrázek 19. Mez pevnosti ve směru L ve vodě 1500. hod., tabulek 15-18.....	50
Obrázek 20. E- Modul pružnosti ve směru L ve vodě 1500.hod., tabulek 15-18.....	51
Obrázek 21. Srovnání hodnot v suchém stavu a po pobytu 1500 hod ve vodě R_m – Mez pevnosti ve směru L srovnán, tabulky 10,19.....	52
Obrázek 22. Srovnání hodnot v suchém stavu a po pobytu 1500 hod. ve vodě R_m – Mez pevnosti ve směru T, tabulky 10, 19	52
Obrázek 23. Porovnání E – modul pružnost v suchém prostředí a 1500 hod. ve vodě, ve směru L, tabulky 10, 19	53
Obrázek 24. Porovnání E-modul pružnosti v suchém prostředí a 1500 hod. ve.....	53

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1 Porovnání mechanických vlastností přírodních a skleněných vláken.....	18
Tabulka 2 VZOREK Č.1 Výrobce - FUNDERMAX (Rakousko).....	41
Tabulka 3 VZOREK Č.2 Výrobce – POLYREY (Francie).....	41
Tabulka 4 VZOREK Č.3 Výrobce ABET (Itálie).....	42
Tabulka 5 VZOREK Č.4 Výrobce Rexin (China).....	42
Tabulka 6 VZOREK Č.1 Výrobce - FUNDERMAX (Rakousko).....	43
Tabulka 7 VZOREK Č.2 Výrobce – POLYREY (Francie).....	44
Tabulka 8 VZOREK Č.3 Výrobce ABET (Itálie).....	44
Tabulka 9 VZOREK Č.4 Výrobce Rexin (China).....	44
Tabulka 10 Shrnutí výsledků po předpokládaném seřazení (směry L, T):	46
Tabulka 11 VZOREK Č.1 Výrobce - FUNDERMAX (Rakousko).....	46
Tabulka 12 VZOREK Č.2 Výrobce – POLYREY (Francie).....	47
Tabulka 13 VZOREK Č.3 Výrobce ABET (Itálie).....	47
Tabulka 14 VZOREK Č.4 Výrobce Rexin (China).....	47
Tabulka 15 VZOREK Č.1 Výrobce - FUNDERMAX (Rakousko).....	49
Tabulka 16 VZOREK Č.2 Výrobce – POLYREY (Francie).....	49
Tabulka 17 VZOREK Č.3 Výrobce ABET (Itálie).....	49
Tabulka 18 VZOREK Č.4 Výrobce Rexin (China).....	50
Tabulka 19 Shrnutí výsledků po 1500h ve vodě.....	51
Tabulka 20 Stanovení koeficientu $\beta^* L$	54
Tabulka 21 Stanovení koeficientu β^* ve směru T	55

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha P I: Zkouška ohybem - jednotlivá měření při normálních podmínkách.

Příloha P II: Zkouška ohybem – po 1500h ve vodě

PŘÍLOHA P I: NÁZEV PŘÍLOHY

TABULKA 22. Všechny naměřené hodnoty:

Č.v.	a ₀ mm	b ₀ mm	R _m MPa	ε _{Fm} %	R _b Mpa	ε _{Break} %	Δ L _{Break} mm	Δ L _{Fm} mm	E MPa
1	4,07	20,14	171,37	1,25	68,70	2,09	3,50	2,09	14285,27
2	4,08	20,12	140,71	0,98	72,52	1,69	2,83	1,64	14567,53
3	4,15	20,12	170,02	1,24	62,41	2,31	3,80	2,04	14418,02
4	4,06	19,92	152,84	1,06	35,71	1,74	2,92	1,79	14717,04
5	4,05	20,06	163,30	1,12	68,92	1,79	3,01	1,88	15204,01
6	4,09	20,11	158,12	1,10	158,12	1,10	1,83	1,83	14932,94
7	4,08	20,07	176,76	1,28	176,76	1,28	2,14	2,14	14308,26
8	4,05	19,96	129,46	0,87	73,57	1,78	3,01	1,47	14460,92
9	4,08	20,16	157,24	1,09	77,52	1,89	3,17	1,82	14413,95
10	4,11	20,06	142,27	1,00	42,40	1,71	2,85	1,66	14149,85
11	4,07	19,81	142,26	1,29	142,26	1,29	2,16	2,16	11455,77
12	3,93	19,62	156,45	1,36	156,45	1,36	2,36	2,36	12014,49
13	4,02	19,72	140,04	1,21	140,04	1,21	2,06	2,06	11733,31
14	4,09	19,78	138,74	1,23	38,51	1,57	2,63	2,06	11428,89
15	4,11	19,78	136,21	1,24	136,21	1,24	2,06	2,06	11248,85
16	4,06	19,71	137,12	1,25	137,12	1,25	2,09	2,09	11618,95
17	3,93	19,64	146,99	1,24	146,99	1,24	2,16	2,16	12308,91
18	3,95	19,58	151,28	1,36	151,28	1,36	2,36	2,36	11668,50
19	3,95	19,6	154,47	1,34	154,47	1,34	2,32	2,32	11939,74
20	4,03	19,8	147,65	1,32	147,65	1,32	2,23	2,23	11831,10
21	3,95	20,23	182,72	1,34	182,72	1,34	2,32	2,32	15427,87
22	3,96	20,22	182,38	1,26	177,89	1,26	2,18	2,17	16059,69
23	3,95	20,18	187,86	1,29	187,86	1,29	2,24	2,24	16207,26
24	3,98	20,11	181,28	1,28	68,36	1,91	3,27	2,19	15627,74
25	3,96	20,13	172,83	1,20	172,83	1,20	2,06	2,06	15167,20
26	3,99	20,27	173,50	1,18	66,94	2,28	3,90	2,03	16052,29

	a ₀	b ₀	R _m	ε _{Fm}	R _b	ε _{Break}	Δ L _{Break}	Δ L _{Fm}	E
Č.v.	mm	mm	MPa	%	Mpa	%	mm	mm	MPa
27	3,98	20,12	185,02	1,29	44,22	2,84	4,87	2,21	15807,40
28	3,99	20,27	182,81	1,25	182,81	1,25	2,15	2,15	16130,49
29	3,95	20,22	184,95	1,35	184,95	1,35	2,33	2,33	15592,73
30	3,98	20,14	185,60	1,34	49,99	2,94	5,05	2,30	15439,03
31	4,07	20,06	107,94	1,05	107,94	1,05	1,77	1,77	10168,47
32	3,83	20,06	105,12	0,96	105,12	0,96	1,70	1,70	10728,93
33	3,91	19,92	111,39	1,11	111,39	1,11	1,94	1,94	9987,16
34	3,93	20,06	101,20	1,04	101,20	1,04	1,81	1,81	9129,66
35	3,85	19,95	107,83	1,02	107,83	1,02	1,81	1,81	10774,55
36	3,84	20,05	99,22	0,89	95,88	0,90	1,59	1,58	11102,22
37	3,93	20,07	96,75	0,98	96,75	0,98	1,70	1,70	9407,62
38	3,81	20,02	99,96	0,96	99,96	0,96	1,71	1,71	10232,36
39	4,06	20,05	96,85	0,93	96,85	0,93	1,56	1,56	10302,31
40	3,83	19,98	102,52	0,99	102,52	0,99	1,77	1,77	10464,46
41	4,06	20,12	107,65	0,98	107,65	0,98	1,65	1,65	10971,33
42	4,06	20,22	115,69	1,05	115,69	1,05	1,77	1,77	10814,78
43	4,09	20,22	123,65	1,15	123,65	1,15	1,93	1,93	10898,20
44	4,05	20,2	113,97	1,02	113,97	1,02	1,72	1,72	10886,26
45	4,09	20,21	104,48	0,95	104,48	0,95	1,59	1,59	10730,00
46	4,09	20,22	126,60	1,16	126,60	1,16	1,94	1,94	11204,57
47	4,09	20,19	97,82	0,90	97,40	0,94	1,57	1,50	10948,48
48	4,07	20,18	123,49	1,15	123,49	1,15	1,93	1,93	11117,80
49	4,05	20,11	110,23	0,98	110,23	0,98	1,65	1,65	11354,51
50	4,05	20,18	139,18	1,27	139,18	1,27	2,15	2,15	11091,36
51	4	19,63	201,56	1,43	201,56	1,43	2,44	2,44	15753,86
52	4,03	19,62	197,23	1,40	47,78	1,92	3,25	2,37	15738,42
53	4,01	19,62	200,82	1,39	200,82	1,39	2,37	2,37	15360,17
54	4,12	19,3	195,35	1,44	195,35	1,44	2,39	2,39	14149,69

	a ₀	b ₀	R _m	ε _{Fm}	R _b	ε _{Break}	Δ L _{Break}	Δ L _{Fm}	E
Č.v.	mm	mm	MPa	%	Mpa	%	mm	mm	MPa
55	4,15	19,37	196,98	1,47	196,98	1,47	2,41	2,41	15414,20
56	4,07	19,36	180,77	1,31	64,34	1,84	3,09	2,20	15123,21
57	4,05	19,56	200,33	1,42	200,33	1,42	2,39	2,39	15952,90
58	4,01	19,57	198,51	1,43	55,54	2,20	3,74	2,43	15109,49
59	4,02	19,83	206,30	1,46	60,60	2,41	4,09	2,48	16017,79
60	4,04	19,83	195,60	1,37	64,37	2,44	4,12	2,31	15911,21
61	3,95	20,19	137,88	1,24	137,88	1,24	2,14	2,14	11985,55
62	3,96	20,17	133,67	1,22	132,28	1,23	2,13	2,10	11672,47
63	3,92	20,1	132,73	1,17	132,73	1,17	2,04	2,04	12068,57
64	3,95	20,22	142,77	1,34	142,77	1,34	2,32	2,32	11257,63
65	3,93	20,48	138,71	1,27	138,71	1,27	2,21	2,21	11639,48
66	3,94	20,45	131,83	1,21	131,83	1,21	2,09	2,09	11560,32
67	3,98	20,32	136,45	1,26	136,45	1,26	2,15	2,15	11796,64
68	3,98	20,17	139,91	1,29	137,58	1,29	2,22	2,21	11659,53
69	3,95	20,18	132,04	1,22	132,04	1,22	2,11	2,11	11479,50
70	3,96	20,19	131,40	1,21	131,40	1,22	2,11	2,09	11509,35
71	3,81	20,12	184,28	1,42	184,28	1,42	2,55	2,55	13959,95
72	3,63	20,1	170,45	1,20	162,18	1,21	2,28	2,26	14680,73
73	3,67	20,19	169,56	1,21	169,56	1,21	2,26	2,26	14580,57
74	3,81	20,12	182,93	1,40	182,93	1,40	2,51	2,51	13884,42
75	3,75	20,23	167,49	1,21	167,49	1,21	2,21	2,21	14326,71
76	3,74	20,22	190,22	1,41	190,22	1,41	2,66	2,66	14589,46
77	3,61	20,1	178,89	1,19	178,89	1,19	2,26	2,26	15692,97
78	3,96	20,13	146,35	1,05	146,35	1,05	1,81	1,81	14092,77
79	4,02	20,13	127,62	0,93	127,62	0,93	1,58	1,58	13779,72
80	3,68	20,19	166,00	1,18	166,00	1,18	2,20	2,20	14724,55

Příloha P II: Zkouška ohybem – po 1500h ve vodě

HP kompozity , T=20C, 1500h ve vodě

TABULKA 23. Všechny naměřené hodnoty:

	a ₀	b ₀	Rm	ε _{Fm}	Rb	ε _{Break}	Δ L _{Break}	Δ L _{Fm}	E
Č.v.	mm	mm	MPa	%	Mpa	%	mm	mm	MPa
81	4,16	20,16	87,31	0,90	5,61	4,27	7,01	1,47	9996,72
82	4,18	20,13	112,51	1,19	35,21	2,01	3,28	1,94	9922,57
83	4,16	20,16	86,81	0,89	41,49	2,02	3,32	1,46	10032,37
84	4,2	20,16	86,47	1,04	30,25	1,99	3,23	1,69	9657,52
85	4,15	20,14	91,64	0,99	18,34	2,88	4,73	1,62	9620,03
86	4,15	20,14	111,35	1,14	111,35	1,14	1,87	1,87	10285,85
87	4,1	20,12	113,68	1,21	113,68	1,21	2,01	2,01	9930,61
88	4,17	20,16	99,86	1,04	30,52	2,19	3,58	1,71	9989,58
89	4,11	20,12	102,27	1,06	6,00	3,92	6,52	1,77	9958,92
90	4,14	20,18	99,63	1,03	36,06	2,12	3,50	1,70	10146,63
91	4,17	19,64	162,10	1,43	32,47	2,14	3,50	2,34	13674,30
92	4,19	19,74	163,39	1,38	61,80	3,08	5,01	2,25	13694,98
93	4,04	19,47	171,35	1,39	34,30	2,64	4,47	2,35	14503,17
94	4,14	19,7	175,42	1,44	35,10	2,40	3,96	2,37	14390,48
95	4,14	19,72	170,72	1,41	53,96	2,07	3,41	2,33	14119,23
96	4,05	19,68	176,36	1,43	35,29	2,21	3,72	2,41	14694,60
97	4,05	19,65	181,80	1,50	35,94	2,14	3,61	2,52	14596,91
98	4,05	19,36	175,01	1,45	175,01	1,45	2,44	2,44	14264,39
99	4,17	19,65	174,10	1,47	53,75	2,85	4,67	2,41	14065,41
100	4,1	19,61	172,38	1,42	67,70	2,91	4,85	2,36	14188,83
101	4,04	20,18	129,36	1,42	129,36	1,42	2,40	2,40	10817,89
102	4,04	20,16	122,93	1,39	122,93	1,39	2,35	2,35	10447,48
103	4,02	20,17	124,63	1,40	124,03	1,41	2,39	2,38	10715,17
104	4,09	20,19	123,04	1,39	122,00	1,40	2,33	2,32	10605,27
105	4,07	20,27	127,45	1,42	127,24	1,43	2,40	2,39	10744,16
106	4,04	20,25	131,31	1,52	131,31	1,52	2,56	2,56	10592,18

	a ₀	b ₀	R _m	ε _{Fm}	R _b	ε _{Break}	Δ L _{Break}	Δ L _{Fm}	E
Č.v.	mm	mm	MPa	%	Mpa	%	mm	mm	MPa
107	4,02	20,28	123,65	1,28	123,00	1,38	2,34	2,17	10720,36
108	4,03	20,26	132,00	1,47	132,00	1,47	2,48	2,48	10725,28
109	4,03	20,12	130,93	1,43	30,72	2,52	4,26	2,42	10979,33
110	3,74	20,17	143,32	1,35	143,32	1,35	2,47	2,47	11831,99
111	3,78	20,16	154,23	1,48	154,23	1,48	2,68	2,68	12072,88
112	3,77	20,2	150,43	1,42	150,43	1,42	2,58	2,58	12129,59
113	3,99	20,18	141,15	1,34	141,15	1,34	2,29	2,29	11793,49
114	3,94	20,14	142,07	1,38	142,07	1,38	2,39	2,39	11723,01
115	3,92	20,15	158,24	1,53	158,24	1,53	2,66	2,66	12209,63
116	3,74	20,14	150,07	1,46	150,07	1,46	2,67	2,67	11970,34
117	4,04	20,14	146,60	1,39	146,60	1,39	2,35	2,35	11870,17
118	3,76	20,16	141,19	1,32	141,19	1,32	2,39	2,39	12075,62
119	3,74	20,13	152,36	1,48	152,36	1,48	2,69	2,69	12053,09
120	4,14	20,11	148,25	1,16	57,41	2,34	3,87	1,91	13708,09
121	4,12	20,09	147,91	1,16	43,87	2,61	4,33	1,93	13813,28
122	4,14	19,93	153,83	1,24	82,62	1,76	2,91	2,05	13524,09
123	4,19	20,03	154,41	1,31	53,23	1,89	3,08	2,13	13053,50
124	4,26	20,03	149,20	1,27	34,64	2,62	4,20	2,04	12840,91
125	4,15	20,01	147,89	1,18	45,35	2,03	3,34	1,94	13523,46
126	4,16	20,05	120,46	0,98	55,38	2,01	3,31	1,60	14058,97
127	4,2	20,03	145,58	1,16	37,37	2,53	4,11	1,88	13642,23
128	4,26	20,05	140,29	1,14	40,11	2,00	3,20	1,83	13301,74
129	4,19	20,02	142,14	1,15	54,15	1,68	2,74	1,87	13395,92
130	4,19	19,78	116,34	1,26	115,07	1,31	2,14	2,05	10308,50
131	4,16	19,77	117,88	1,34	23,56	1,93	3,17	2,20	10097,54
132	4,11	19,69	118,37	1,29	33,43	2,05	3,40	2,14	10275,90
133	4,07	19,68	124,93	1,45	124,85	1,46	2,45	2,44	10571,94
134	4,11	19,76	126,26	1,43	126,20	1,44	2,39	2,38	10582,78
135	4,14	19,83	117,59	1,30	117,59	1,30	2,14	2,14	10414,46

	a ₀	b ₀	R _m	ε _{Fm}	R _b	ε _{Break}	Δ L _{Break}	Δ L _{Fm}	E
Č.v.	mm	mm	MPa	%	Mpa	%	mm	mm	MPa
136	4,09	19,81	120,05	1,31	24,00	2,03	3,39	2,19	10812,83
137	4,24	19,95	118,03	1,36	35,59	2,04	3,28	2,20	10251,05
138	4,18	19,78	118,87	1,33	118,86	1,33	2,18	2,17	10425,03
139	4,2	19,95	117,68	1,23	117,68	1,23	2,01	2,01	10442,21
140	4	20,28	163,89	1,33	163,89	1,33	2,27	2,27	14463,77
141	3,95	20,3	170,96	1,35	34,21	3,71	6,41	2,34	14715,14
142	4,02	20,21	167,68	1,36	46,34	2,50	4,25	2,31	14524,10
143	4,04	20,4	167,38	1,35	67,07	1,96	3,32	2,28	14683,29
144	4,02	20,19	161,08	1,30	161,08	1,30	2,21	2,21	14401,44
145	4,03	20,4	163,51	1,29	62,94	3,09	5,24	2,18	14730,28
146	4,01	20,29	157,53	1,23	49,31	2,19	3,74	2,09	14577,24
147	3,98	20,33	165,88	1,36	56,11	2,41	4,13	2,33	13868,81
148	4	20,3	164,58	1,32	164,58	1,32	2,25	2,25	14481,98
149	4,03	20,29	162,39	1,35	61,26	1,91	3,24	2,29	14105,61
150	3,94	19,99	112,07	1,35	112,07	1,35	2,35	2,35	9258,95
151	3,97	20,05	107,99	1,25	107,99	1,25	2,15	2,15	9423,27
152	4,01	20	108,22	1,39	108,22	1,39	2,37	2,37	8717,17
153	4,21	20,04	107,72	1,42	104,20	1,43	2,31	2,30	8615,38
154	4,22	20,03	101,93	1,33	101,93	1,33	2,16	2,16	8470,66
155	3,93	20,05	108,26	1,27	108,26	1,27	2,21	2,21	9355,28
156	3,96	20,02	102,50	1,17	100,95	1,18	2,03	2,02	9381,00
157	3,94	19,97	100,24	1,17	100,24	1,17	2,02	2,02	9279,01
158	3,94	20	107,89	1,28	107,89	1,28	2,21	2,21	9248,27
159	3,93	20,03	105,44	1,20	105,44	1,20	2,09	2,09	9483,76