

Vyztužené plasty a jejich některé aplikace

Ing. Adolf MUSIL
Ing. Petr MITÁČEK
MENDELU, Zkušebna STV Zlín

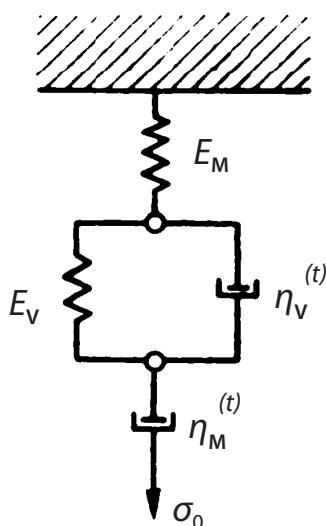
V současné době patří stavebnictví mezi největší odběratele vyztužených plastů a jejich spotřeba neustále stoupá, když např. v Německu byla v roce 1965 kolem 12 000 tun a dnes se blíží k hodnotě cca 70 000 tun. 65 let vývoje oboru vyztužených plastů vedlo k tomu, že dnes je tyto hmoty možno považovat za kvalitní konstrukční materiál, jehož mechanické vlastnosti jsou srovnatelné s některými kovy.

V České republice byla provedena od-
vážná konstrukce obvodového pláště na věži
spojového a hotelového střediska na vrcholu
Ještědu již v roce 1968 (obrázek 1). Byl nav-
ržen rotační plášť objektu tvaru jednodílného
hyperboloidu zborcené přímkové plochy.
Autorem projektu byl Ing. arch. Karel Hubá-
ček z tehdejšího Stavoprojektu Liberec, který
za tento unikátní návrh získal cenu Auguste
Perreta a kterou mu tehdejší režim neumožnil
v Paříži osobně převzít.

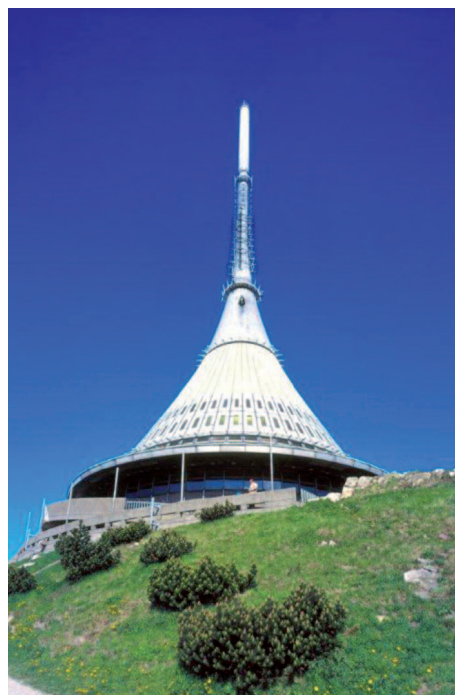
Nosná konstrukce pláště byla vytvoře-
na pomocí sklolaminátových tyčí průměru
20 mm v soustavě dvou osnov vzájemně se
křížících přímk. Na tuto konstrukci byly pak
zavěšeny lichoběžníkové obvodové panely
z polyesterové pryskyřice a několika vrstev
skelné tkaniny.

Statici předpokládali, že použité plasty se
při krátkodobém působení zatížení chovají
viskoelasticky lineárně.

V tom případě je možno uvažovat celko-
vé přetvoření (ε_t), jako součet jednotlivých
přetvoření součástí modelů Maxwella a Voig-
ta, jejichž spojením vznikl model Tucketův
(obr. 2), kde napětí σ_0 je stálé.



Obr. 2 – Model lineárně viskoelastického tělesa



Obr. 1 – Celkový pohled na věž

Platí tedy, že:

$$\varepsilon_t = \varepsilon_{ME} + \varepsilon_V + \varepsilon_{M\eta} ,$$

kde $\varepsilon_{ME} + \varepsilon_{M\eta}$ je celkové přetvoření podle
modelu Maxwella,
 ε_V přetvoření podle modelu
Voigta.

$$\varepsilon_V = \frac{\sigma_0}{E_V} \cdot \left(1 - \exp - \frac{t}{\tau} \right) ,$$

kde σ_0 je napětí,
 E_V modul pružnosti pružiny
podle modelu Voigta,

$$\tau = \frac{\eta_{KV}}{E_{KV}} \text{ relaxační doba,}$$

η_V viskozita prostředí v pístu
modelu Voigta.

Po dosazení do rovnice pro ε_t můžeme
psát:

$$\varepsilon_t = \frac{\sigma_0}{E_M} + \frac{\sigma_0}{E_V} \cdot \left(1 - \exp - \frac{t}{\tau} \right) + \frac{\sigma_0}{\eta_M} \cdot t ,$$

kde E_M je modul pružnosti pružiny
v modelu Maxwella,
 η_M viskozita prostředí v pístu
modelu Maxwella.

V popisované konstrukci je kritické napětí
v oblasti kotvy laminátové tyče vzniklé sou-

časným působením tahového napětí ve smě-
ru vláken (σ_1) a tlakového napětí na pláští tyče
sevržené v kotvě ($\sigma_3 = \sigma_2$).

Protože se mez pevnosti v tlaku (σ_{Pd}) lišila
od meze pevnosti v tahu (σ_{Pt}), vyhověla jedna
z hypotéz Mohra, kde:

$$\sigma_{red} = \sigma_1 + \frac{\sigma_{Pt}}{\sigma_{Pd}} \cdot \sigma_3 < \sigma_{Pt}$$

Autoři realizovaného projektu vypracovali
teoretické řešení mezního napětí v tahu ve smě-
ru vláken, při jehož dosažení se tyč poruší.

$$\sigma_1 = \frac{-B + \sqrt{B^2 + 4A\sigma_{Pd}}}{2A} , \text{ kde}$$

$$A = \left(\frac{\mu_3 - 1}{E_3 \cdot \mu_3} \cdot \frac{\sigma_{Pd}}{\sigma_{Pt}} - \frac{1}{E_1 \cdot \mu_1} \right) \cdot C ,$$

$$B = \left(1 - \frac{\mu_3 - 1}{E_3 \cdot \mu_3} \cdot \sigma_{Pd} \right) \cdot C + \frac{\sigma_{Pd}}{\sigma_{Pt}} , \text{ a}$$

$$C = \frac{d \cdot (\sin \delta + f_2 \cos \delta)}{4L f_1^2 (\cos \delta - f_2 \sin \delta)}$$

kde E_1, E_3 jsou moduly pružnosti sklola-
minátu (polyester + skleněné
vlákno)
 μ_1, μ_3 Poissonovy konstanty,
 d průměr tyče
 δ úhel povrchové přímky kuže-
lové plochy ocelové kotvy
 f_1 koeficient tření mezi lami-
nátoovou tyčí a ocelí vnitřní
kuželky
 f_2 koeficient tření (ocel/ocel)
 L délka části tyče sevržené
v kotvě.

Dosažením odpovídajících hodnot pro
dané materiály bylo výpočty potvrzeno, že
 $\sigma_{red} < \sigma_{Pt}$, tedy technické řešení uvažovaných
detailů je správné a v komplexním pojetí uka-
zuje, že navržení takové konstrukce je realizo-
vatelné a zároveň i užitečné.

Polyesterové pryskyřice

Tedy popsaná konstrukce pláště z plastů
byla vysoce kvalitním technickým řešením
s použitím polyesterové pryskyřice ChS 104
vyztužené skleněnými vlákny. Oba materiály
jsou důležitou součástí kompozitů, kde skle-
něná výztuž je nositelem mechanických vlast-
ností a pryskyřice, která jako matrice obaluje
vlákna, dodává laminátu odpovídající odol-
nost, která byla potvrzena životností stavby,

v současné době větší než 40 let. Za zmínku ještě stojí poprvé použití tmelu Lukopren S9410 u některých okenních konstrukcí v této nadmořské výšce (1 012 m n.m.).

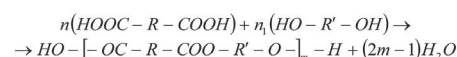
Vzhledem k tomu, že tyto vrstvené hmoty vytvrzují za normální teploty a tlaku, je možno jejich použití přímo v exteriéru. Základní pryskyřice je polyester dikarbonových kyselin, z nichž určitá část je nenasycená kyselina s glykoly. Tento polyester radikálově kopolymeruje s vinylovým monomerem, např. styrenem. Iniciační systém se volí podle vytvrzovací teploty (např. metyletylketonperoxid při 20 až 50 °C) s urychlovači na bázi terciárních aminů (dimetylanilín).

Kopolymerace je silně exotermní reakce a hned na jejím počátku dochází k síťování a želatinaci. Struktura je vytvořena polyesterovými řetězci, na které jsou naroubovány makromolekuly polyesteru vytvářející příčné vazby. Před vytvrzením má roztok viskozitu 2000 až 3000 mPas, který po vytvrzení přejde ve tvrdou netavitelnou hmotu s těmito základními vlastnostmi (viz tabulka 1):

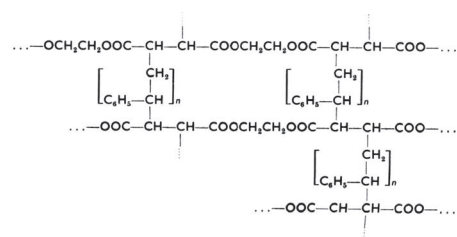
Tabulka 1 – Některé vlastnosti vytvrzených polyesterových pryskyřic

Vlastnost	Jednotka	Hodnota
měrná hmotnost	kg.m ⁻³	1200–1300
smrštění	%	6–15
pevnost v tahu	N.mm ⁻²	25–65
pevnost v tlaku	N.mm ⁻²	90–160
pevnost v ohybu	N.mm ⁻²	65–130
tvrdost (Brinell)	N.mm ⁻²	100–230

Reakce probíhá rychle a dochází ke smrštění hmoty (6 až 15 %). Tuto syntézu (polyesterifikaci) lze schematicky popsat:



Polymer s prostorovou strukturou lze znázornit takto:



Pro vytvrzování se používá zhruba poměr pryskyřice : iniciátor (katalyzátor) : urychlovač = 100 : 2 až 3 : 0,5 až 1 hm.d.

Z dříve používaných typů lze jmenovat ChS Polyester 104 s katalyzátorem P VI (metylcyklohexanonperoxid) a urychlovačem (promotorem) PI (naftenan kobaltnatý). Zpracování probíhalo do 20 minut před želatinací, aby nedocházelo k nadměrnému odpařování

monomeru, což by mělo za následek prudký pokles mechanických pevností.

Dnes jsou na trhu ChS Polyester 109 a 111, Polimal 104, Aropol M 105 TA, PolyLite 440-M850 a další. V tabulce 2 jsou uvedeny některé mechanické vlastnosti po vytvrzení.

Tabulka 2 – Některé vlastnosti vybraných polyesterových pryskyřic

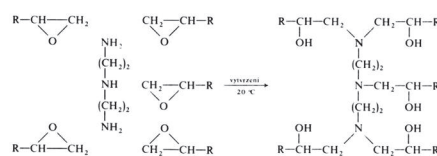
Vlastnost	Jednotka	Polimal 104	POLYLITE 440-M850
modul pružnosti v tahu	N.mm ⁻²	3600	4600
pevnost v tahu	N.mm ⁻²	70	50
pevnost v tlaku	N.mm ⁻²	120	–
pevnost v ohybu	N.mm ⁻²	–	90
tažnost	%	3,6	1,6

U polyesterových pryskyřic byla docílena vyšší chemická a tepelná odolnost použitím různých typů isoftalových, orthoftalových i bisfenolických modifikací, které např. při tzv. plátování s termoplasty (PVC) mohou docílit takových vlastností, že jsou použitelné pro výrobu stabilních uzavřených nádob, kde mohou být skladovány kyseliny, louhy, mořící i odmašťovací lázně, pohonné hmoty, různé emulze a suspenze, ovocné šťávy, apod.

Epoxidové pryskyřice

Epoxidové pryskyřice tvoří další skupinu polymerů, kterými se dají vytvářet vyztužené plasty (lamináty), které dosahují v některých případech vyšších mechanických parametrů než polyesterové.

Před vlastní technologií zpracování se mísí s tzv. tvrdidly, které jsou schopny reagovat s epoxidovou skupinou – CHO – CH₂. Základní pryskyřice jsou viskózní kapaliny, které vznikají reakcí 2,2-bis(4'-hydroxyfenyl)propanu s epichlorhydrinem (chlormethyloxiranem). Síťovací mechanismus je možné znázornit:



K vytvrzení lineárního polykondenzátu se používá např. polyfunkční amin – diethylen-

triamin. S tímto tvrdidlem reagují epoxidové i volné hydroxylové skupiny polykondenzátu za vzniku trojrozměrné zesíťované makromolekuly. Některé fyzikální vlastnosti vybraných epoxidových pryskyřic jsou uvedeny v tabulce 3.

Uvedené vlastnosti lze podstatně zvýšit u některých druhů laminací, například použitím řady různých druhů plniv. Jak již bylo řečeno obsah skla má podstatný vliv na mechanické vlastnosti laminátu a skleněný textil v různých formách jako jeho součást se na tom výrazně podílí.

Příprava pryskyřic k laminaci předpokládá, že známe jisté zákonitosti jejich přetváření, abychom mohli předpovídat možnosti vzniku poruchových zón, které pak v jejich kritických místech eliminujeme technologickou skladbou odpovídajících výztuh, které zamezí růstu trhlin vedoucí k poruše dílce. Růst trhlin od místa iniciace lze pozorovat na zkušebních vzorcích čistých vytvrzených pryskyřic při napětovém zatížení konkrétního místa povrchu zkoumaného tělesa.

Výzkum v této oblasti byl popsán řadou autorů a vedl hlavně k tomu, aby potvrdil důležitost vyztužení zkoumaných síťovatelných polymerů pro jejich použití u navrhovaných nekonvenčních konstrukcí.

Na základě praktických zkoušek s posuzováním konkrétních vad formuloval I. N. Sneddon vztah pro mezní hodnotu napětí u kruhové trhliny v křehkém tělese vytvrzené pryskyřice:

$$\sigma_{KR} = \sqrt{\frac{\pi \cdot E \cdot K}{2 \cdot (1 - \mu^2) \cdot l_0}} \quad ,$$

kde E je modul pružnosti v tahu
 K střední hodnota hustoty energie pro vznik lomu
 μ Poissonův poměr
 l_0 průměrná délka zavřených trhlin.

Průběh rychlosti trhliny závisí na úrovni nominálního napětí a po dosažení hodnoty

$$v = 0,6 \cdot \sqrt{\frac{G}{E}} \cdot c_{\max} = 400 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \text{ nastává sklon}$$

k jejímu větvení.

POZNÁMKA: $c_{\max}$ je rychlost příčných elastických vln šířících se v obou polovinách štípaného pásu, což odpovídá rychlosti zvuku v daném materiálu.

Tabulka 3 – Některé vlastnosti vytvrzených epoxidových pryskyřic

Vlastnost	ChS-Epoxy 110	EBOLIT 500	EBOLIT 501	EPDUR 619-0600	RECAFORT D80-20	REPUTRON D68-4
mez pevnosti v tahu [N.mm ⁻²]	50–80	min. 40	min. 35	70–80	73	65
tažnost [%]	–	–	–	5–6,5	–	–
mez pevnosti v tlaku [N.mm ⁻²]	161	–	min. 90	120–140	205	180
mez pevnosti v ohybu [N.mm ⁻²]	90–120	min. 90	min. 60	110–120	120	110
modul pružnosti [N.mm ⁻²]	3000–4000	–	–	3000–3300	–	–
pryskyřice : tvrdidlo	100 : 60	100 : 40	100 : 36	100 : 40	100 : 24	100 : 52

Při zkoušení křehkých materiálů bylo zjištěno, že určením kritické délky trhliny a její další iniciací v místě vrubu úderem, lze docílit při vnějším zatížení prostup celou zkušební deskou [2]:

$$l_{KR} = K_1^2 \cdot \frac{E \cdot K}{\sigma_n^2},$$

kde K_1 je energie pro vyvolání vzniku trhliny
 σ_n tahové napětí nutné pro rozběh trhliny.

Šíření trhlín je rychlé a napětí v tahu je rozhodující pro jejich růst. Tyto zjištěné skutečnosti, které byly potvrzeny řadou zkoušek, vedly k tomu, že mechanické vlastnosti pryskyřic pohybující se u hranic jejich křehkosti, bylo potřeba radikálně zvýšit volbou vhodných plniv a především skla, které zde má podstatný vliv a je ho možno použít v různých formách.

Objemový obsah skla neorientovaného plniva se může pohybovat v rozmezí 15 až 45 %. Plniva s uspořádanou strukturou (tkaniva a orientované vlákna) umožňují zvýšit tento obsah až na 50 až 85 %, což vede zároveň i ke zvýšení pevnosti laminátů.

Pro vytužování jsou vhodná vlákna málo alkalická (např. hliníboritokřemičitá sklovinna). Pro jejich tažení se používá platinových pecí (1250 °C). Roztavená sklovina vytéká z trysek a je odtahována rychlostí cca 50 m.s⁻¹.

Pak se sdružuje do pramence a lubrifikuje v emulzním roztoku pro usnadnění zpracování vláken na textil. Vlákna se tkají do vazeb plátňové, keprové, atlasové, aj. Pro laminaci se používá i skleněných stříží a rohoží. Vliv obsahu skla a druh vazby na mechanické vlastnosti kompozitů vyplývá z údajů v tabulce 4:

Tabulka 4 – Mechanické vlastnosti skelných laminátů

Vlastnost	Jednotka	Rohož	Plátno	Kepr
obsah skla	hm. %	33	65	65
měrná hmotnost	kg.m ⁻³	1600 až 1800	1750	1850
pevnost v tahu	N.mm ⁻²	max. 135	300	500
pevnost v tlaku	N.mm ⁻²	max. 150	250	500
pevnost v ohybu	N.mm ⁻²	max. 200	400	800
modul pružnosti	N.mm ⁻² .10 ⁴	1,2	2,1	3,5

Pevnost vytužených skleněných vláken ovlivňuje významně mechanické vlastnosti laminátů a v řadě prací byla podrobně studována. Pro výpočet teoretické pevnosti skla lze použít vzorce:

$$\sigma_{\max} \approx \sqrt{\frac{EU}{r_0}} \quad (\text{J. Němec, S. V. Serensen}),$$

kde E je modul pružnosti
 r_0 rovnovážná vzdálenost mezi molekulami
 U povrchová energie materiálu.

Za předpokladu, že $r_0 = 2,5 \cdot 10^{-8}$ až $1,5 \cdot 10^{-7}$ cm a $U = 10^{-5}$ až 10^{-4} J.cm⁻² se pevnost $\sigma_{\max}$ pohybuje v rozmezí 10 000 až 20 000 N.mm⁻². A. A. Griffith odvodil hodnotu teoretické pevnosti skla na 11 000 N.mm⁻². Experimentální výsledky však ukazují, že pevnost reálných skelných vláken je daleko nižší, než získané teoretické pevnosti.

Pevnost vlákna z experimentálně získaných hodnot souvisí se stupněm tažení podle empirické rovnice:

$$\sigma_p = C \cdot z^{-\frac{1}{n}} = \left(a + b \cdot \sqrt{k_\varepsilon} \right) \cdot z^{-\frac{1}{n}},$$

kde a je funkcí chemického složení a teploty taveniny
 b funkce závislá jen na chemickém složení
 n konstanta zahrnující rozdělení defektů na povrchu
 z délka vlákna
 k_ε konstanta, která charakterizuje viskózní tok při tažení

$$k_\varepsilon = \frac{L}{L_0},$$

L délka vytaženého vlákna z počáteční délky L_0 .

Například pro hliníboritokřemičitá vlákna vyplývají hodnoty:

$a = 1,11 \cdot T - 1220 = 167,5$
 (teplota tažení vlákna $T = 1250$ °C)
 $b = 1,15$
 $n = 4$
 $k_\varepsilon = 2$
 $z = 90$ mm

$$\text{čili } C = a + b \cdot \sqrt{k_\varepsilon} = 167,5 + 1,15 \cdot 1,4142 = 169,1$$

$$\text{pak } \sigma_p = C \cdot z^{-\frac{1}{n}} = 169,1 \cdot 90^{-0,25} = 54,9 \text{ kp.mm}^{-2} \approx 538 \text{ N.mm}^{-2}$$

Empirický výpočet stanovil pevnost v tahu na cca poloviční hodnotě pevnosti určené z tahového diagramu její závislosti na složení vláken a jejich průměru (tabulka 5).

Tabulka 5 – Složení skla E (Electrical Standing Glass)

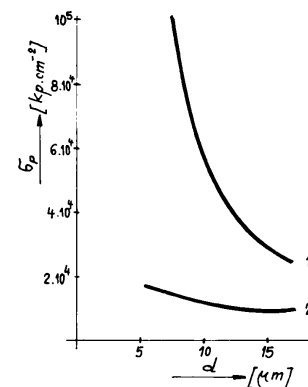
Oxid	%
SiO ₂	54,5
Al ₂ O ₃	15
CaO	17
MgO	4,5
B ₂ O ₃	8
Na ₂ O + K ₂ O	1

Vzhledem k tomu, že viskózní tavenina skla je nestlačitelná, je možno psát:

$$\sqrt{k_\varepsilon} = \frac{d_0}{d} = \frac{0,014}{0,010},$$

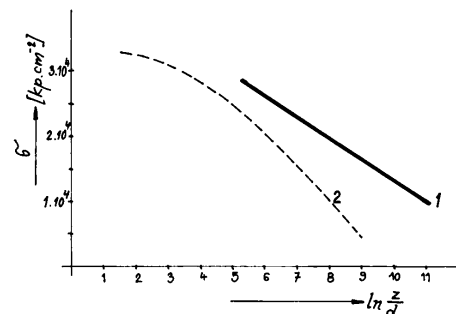
kde d_0 je průměr průvluhu trysky
 d průměr vlákna.

Tedy pevnost jakéhokoliv výchozího svazku vláken závisí na velikosti průměru vlákna a na složení skla (obrázek 3).



Obr. 3 – Pevnost vláken v závislosti na jejich průměru
 1 – křemenné sklo; 2 – tavený čedič

Dalším faktorem, který výrazně ovlivňuje pevnost vláken je také jejich délka při umístění v osnovách zhotovených z vláken o stejném průměru (obrázek 4).



Obr. 4 – Pevnost vláken v závislosti na poměru jejich délky k průměru d
 1 – sklo E; 2 – sklo S

Pracujeme-li s vláknem o průměru 10 μm, tak při jeho ploše 7,85.10⁻⁵ mm² se nachází v 1 mm² 12739 ks vláken. Vzhledem k tomu, že skleněné pramence se paralelně a bezzákrutově sdružují v tlustý pramenec vlákna o počtu až 24 000 ks, je vytvořena plocha o velikosti cca 2 mm², na kterou působí normálové napětí.

Skleněné pramence (roving) jsou i základním materiálem pro výrobu rohoží ze sekaných pramenců všech druhů stříží a pramencových tkanin. Některé technické charakteristiky rovingu Vetrotex jsou uvedeny v tabulce 6.

Tabulka 6 – Technické charakteristiky rovingu Vetrotex

Typ	Aplikace	Obsah spalitelných látek [%]	Vlhkost [%]	Stručná charakteristika
P224	stříkání	1,00	0,15	dobrá sekatelnost a rychlé prosycení
P192	vinutí	0,50	0,20	přímý roving kompatibilní s polyesterovými a epoxidovými pryskyřicemi
P250	sekání	0,75	0,20	pro vyztužení
P208	odstředivé lití	0,80	0,20	výroba trubek
P243	transparentní desky	0,68	0,15	výroba transparentních trubek

Rohože ze sekaných pramenců

Jsou vyráběny z neorientovaných sklovláknitých pramenů o délce 50 mm vyrobených ze skla typu E (Eutal), spojených emulzním nebo práškovým pojivem. V následujících tabulkách jsou uvedeny vlastnosti rohoží z nekonečných sklovláknitých pramenců Unifilo a z pramenců sekaných (vybrané druhy).

Tabulka 7 – Rohože Unifilo

Typ	Obsah spalitelných látek [%]	Vlhkost [%]	Stručná charakteristika
U801	1,6	0,15	tvárově složité výrobky
U850	6,0	0,15	jednoduché tvary
U528	5,5	0,15	tažené profily
U164	4,0	0,15	vlnovky, panely

Tabulka 8 – Rohože ze sekaných pramenců

Typ	Plošná hmotnost [g.m ⁻²]	Obsah spalitelných látek [%]	Vlhkost [%]	Stručná charakteristika
M534	300 – 600	4,0 – 4,5	0,3	emulzní rohož zaručující rychlé prosycení a nízkou spotřebu pryskyřice
M5	225 – 600	4,0	0,3	emulzní rohož se snadnou manipulací a tvarováním
M113	225 – 600	4,0	0,2	prášková rohož s výbornou průsvitností
M123	225 – 600	4,0	0,2	prášková rohož se snadným prosycením

Rovingové tkaniny

Jsou vyráběny z rovingů nebo sklovláknitých pramenců převážně s rovnoměrnou dobou stavou, ale i jako jednosměrné tkaniny a pásy. Technické charakteristiky základního sortimentu uvádí tabulka 9.

Tabulka 9 – Charakteristika rovingových tkanin

Typ	Plošná hmotnost [g.m ⁻²]	Vazba	Šířka role [cm]	Délka role [m]
RT200–0001	204	plátno	20 – 305	122
RS290–2349	279	kepr 1/3	130	150
RC1000–0001	996	kepr 2/2	40 – 130	50
UD440–2372	444	plátno	40 – 141	80
UC600–0001	603	plátno	15 – 141	80
RRT177–0001	177	plátno	6 – 20	100

Základních vazeb je velké množství a všechny lze odvodit od tří nejpoužívanějších. Nejjednodušší z nich je plátnová vazba (obrázek 5), kde v každém vazbovém bodě se váže osnova s útkem. Jiná základní vazba je keprová, která se vyznačuje tím, že vazbové body nebo uvolněné příze tvoří žebra (šikmé řádky) pravého nebo levého směru (obrázek 6). Atlasová vazba má vazbové body (obrázek 7) pravidelně rozmístěné, ale navzájem se nedotýkající.



Obr. 5 – Plátnová vazba skleněných tkanin (Frenzelit)



Obr. 6 – Keprová vazba skleněných tkanin



Obr. 7 – Atlasová vazba skleněných tkanin

V poslední době se jako plnivo v kompozitních materiálech začalo používat nanovláknů s průměrem menším než 1 μm. Nanotrubičky jsou vláknenné útvary s dutou formou uhlíku (průměr 50 až 200 nm, délka několik mikrometrů). Experimenty s extrémně viskózní epoxidovou pryskyřicí s použitím ultrazvuku pro odstranění vzduchových bublin byly prováděny na Technické univerzitě v Liberci, Textilní fakultě, Katedře netkaných textilií.

Výhodné vlastnosti těchto plniv se uplatňují hlavně při ohybovém namáhání kompozitů, kdy nedochází ke vzniku trhlin v jejich mezivrstvách.

Samozřejmě se používá i nadále klasické plnění kompozitů (10 až 90 hm. %) anorganickými i organickými plnivy jemně umletými jako koloidní oxid křemičitý, uhlíkatý vápenatý, kaolin, sádra, cement, písek, cihelný prach (např. antuka), popílek, briketový popel, mletá slída, grafit, práškové kovy, oxid antimonitý (snížení hořlavosti), práškové termoplasty (např. PVC, PE), vlákna (např. sisal – agáve), dřevěná moučka, whiskery, mikrokuličky (balotina), apod.

Důležitým parametrem těchto materiálů pro výsledné vlastnosti kompozitů jsou jejich rozměry, distribuce, velikost a tvar jednotlivých částic.

K drcení se používá např. čelistový drtič BB 200 (z 90 mm na 2 mm), jemné mletí lze docílit ultraodstředivým mlýnem ZM 200 (z 10 mm na 40 μm) nebo homogenizací planetovými kulovými mlýny (z 10 mm na 0,1 μm). Tato tzv. nevyztužující plniva nezvyšují radikálně pevnostní charakteristiky laminátů, ale jsou spíše pouze cenovými regulátory. Některé vlastnosti laminátů udává tabulka 10.

Tabulka 10 – Fyzikálně-mechanické vlastnosti epoxidových a polyesterových skelných laminátů

Vlastnost	Jednotka	KITEX	KITEX P (Reputron D68-4)	EPOXY	EPOXY	PESL	PESL	PESL	EPOXY
výztuha		balotina	vlákno	rohož	roving	vlákno	tkanina	vlákno	drcený křemen
obsah skla	%	2,3	70	30–35	55–65	15	60	65	80
pevnost v tahu	N.mm ⁻²	63	1200	120–180	550–800	30	350	400	34
modul pružnosti	N.mm ⁻²	–	–	1,0–1,5.10 ⁴	5,0–20,0.10 ⁴	1,0.10 ⁴	2,1.10 ⁴	2,4.10 ⁴	–
pevnost v tlaku	N.mm ⁻²	90	2100	–	–	120	230	320	237
pevnost v ohybu	N.mm ⁻²	105	1650	150–250	650–1050	80	400	550	95
pevnost ve smyku	N.mm ⁻²	40	960	80–120	280–480	–	280	–	–
tažnost	%	3	1,5	2	1,5	–	–	–	–
hustota	kg.m ⁻³	1000	1950	1500–1600	1900–2000	1730	1750	1800	1820

POZNÁMKA: Reputron D68-4 – PUR modifikace

Napjatost ve vyztužení polymerní matrice je způsobena vnějším zatížením, tepelnými a jinými jevy. W. H. Sutton a W. Rosen studovali chování polyesterových laminátů s 50 % objemovým obsahem skleněných vláken. Velikost radiálních napětí vznikajících např. při změně teploty je přibližně dána vztahem:

$$\sigma_r = \Delta T \cdot \frac{(\alpha_M - \alpha_V) \cdot E_M}{(1 + \mu_M) + (1 + \mu_V) \cdot \frac{E_M}{E_V}},$$

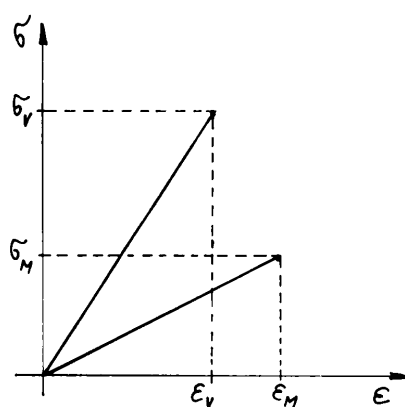
kde $\alpha_M = 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$; $\alpha_V = 0,5 \cdot 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ jsou koeficienty teplotní roztažnosti pryskyřice a vlákna

$\mu_M = 0,34$; $\mu_V = 0,22$ jsou Poissonovy poměry pryskyřice a vlákna.

Platí, že
$$\mu = \frac{\frac{E}{G} - 2}{2} = \frac{V_0 - V}{2V_0} \cdot \frac{l_0}{l},$$

kde V_0 je počáteční objem materiálu, V objem materiálu po jeho protažení
 l_0 počáteční délka materiálu
 l délka materiálu po protažení.

Při $E_M = 6000 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-2}$ a $E_V = 86000 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-2}$ a při teplotní změně $\Delta T = 75 \text{ } ^\circ\text{C}$ je $\sigma_r = 30 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-2}$, tedy můžeme přibližně určit zbytková radiální napětí, např. při teplotě vytvrzování $100 \text{ } ^\circ\text{C}$ a jejímu poklesu na $25 \text{ } ^\circ\text{C}$. Přitom snahou bude vždy využití pevnosti vláken při mezním prodloužení matrice (obrázek 8).



Obr. 8 – Mezní prodloužení matrice s využitím pevnosti vlákna ($\epsilon_M > \epsilon_V$)

Zahrátím tato zbytková napětí opět vymizí. Teplota u vrstvených hmot hraje důležitou úlohu, jako např. při plátování termoplastů. Pokud kombinujeme tak rozličné materiály, musíme počítat s tím, že na jejich rozhraní vzniknou značná pnutí vlivem jejich různé teplotní roztažnosti.

V tomto případě lze použít pro výpočet napětí v termoplastu rovnici:

$$\sigma = \frac{(\alpha_1 - \alpha_2) \cdot \Delta T \cdot E_1}{1 - \mu_1},$$

kde α_1 je koeficient délkové tepelné roztažnosti termoplastu
 α_2 koeficient délkové tepelné roztažnosti termoplastu
 ΔT teplotní rozdíl
 E_1 modul pružnosti termoplastu
 μ_1 Poissonova konstanta termoplastu.

Použitý termoplast může být např. polyetylén, polypropylén, polyvinylchlorid i další, které bezpečně odolají tepelné zátěži. Kombinace s laminátem využije jejich chemickou odolnost vůči různým médiím s tím, že laminát vydrží značné a různorodé zatížení a je tedy nosným prvkem konstrukce.

Závěrem můžeme říci, že v oblasti vrstvených plastů nebylo objeveno úplně vše, čím tento technický materiál disponuje. Jde o daleko bohatší možnosti, které zatím nejsou využívány v plné míře. Zvláště důležité je zvládnutí technologie přesného kladení čtvercových (a případně i jiných) hexagonálních skleněných výplňových sestav, aby pevnostní charakteristiky laminátů mohly být vyhodnocovány nejenom statisticky, ale případ od případu zkoumané technické sestavy.

Vývoj jistě povede k rozvoji těchto druhů plastů a tím i k jejich speciálnímu použití,

kde se doposud uplatňovaly jen kovové konstrukce a to nejenom ve stavebnictví.

symbol	význam symbolu	rozměr
ϵ	poměrné prodloužení	1, příp. %
σ_0	napětí	$M L^{-1} T^{-2}$
E	modul pružnosti v tahu	$M L^{-1} T^{-2}$
G	modul pružnosti ve smyku	$M L^{-1} T^{-2}$
σ_{Pt}	mez pevnosti v tahu	$M L^{-1} T^{-2}$
σ_{Pd}	mez pevnosti v tlaku	$M L^{-1} T^{-2}$
τ	relaxační doba	T
η	viskozita	$M L^{-1} T^{-2}$
K	plošná hustota energie	$M T^{-2}$
μ	Poissonův poměr	bezrozměrný

Literatura

- [1] Novák, J., Tobolka, Z.: Plastické hmoty na konstrukci obvodového pláště vysílače Ještěd. Pozemní stavby, č. 5, 1972
- [2] Němec, J., Serensen, S., V. a kol.: Pevnost plastických hmot. SNTL Praha, 1970
- [3] Zámorský, Z.: Nauka o makromolekulárních materiálech, syntetické polymery, jejich výroba, struktura a vlastnosti. VUT Brno, 1989
- [4] Červinka a kol.: Chemie organických sloučenin, SNTL Praha, 1987
- [5] Firemní literatura fy Vetrotex Reinforcements Bohemia, s.r.o., Litomyšl
- [6] Firemní literatura fy Retsch, GmbH, Haan, Německo
- [7] Firemní literatura fy Reomas bv, Zutphen, Netherlands
- [8] Firemní literatura fy Frenzelit Werke GmbH, Bad Berneck, Německo



Obr. 9 – Ilustrační foto věže k památce arch. Ing. Karla Hubáčka