

Aplikace vláknových polymerních kompozitů ve stavebnictví

Jiří Minster

Ústav teoretické a aplikované mechaniky AV ČR

Úvod

O výhodách spojených s použitím kompozitních materiálů ve stavebnictví se obecně ví, ale malý pokrok v jejich masovém použití ukazuje, jak obtížně se u nich dosahuje ekonomická cena, která ve formě přímých nákladů je často hlavním a jediným parametrem při rozhodování o jejich aplikaci. Kompozity pro stavební konstrukce mají tu nevýhodu, že se s nimi potencionální zájemci často seznamují bez hlubší znalosti jejich možností a výhod.

Z materiálového hlediska nepředstavuje použití vláknových polymerních kompozitů (VPK) pro stavební konstrukce revoluční krok. Spíše jde o logický vývoj od přírodních kompozitů, jakými jsou např. dřevo, přes člověkem vytvořené složené materiály, které v době svého vzniku nebyly chápány jako kompozity (cihly, keramika, beton prostý, vyztužený i předpjatý) až ke konstrukcím hybridním a zcela kompozitním, které jsou schopny plně využít jak předností jednotlivých složek, tak jejich synergické spolupráce. Všechny hlavní přednosti vláknových kompozitních materiálů, tj. příznivý poměr pevnosti a hmotnosti, odolnost proti únavě a vlivům prostředí, mechanické vlastnosti šité na míru a relativně snadná tvarovatelnost se přirozeně uplatňují i ve stavebnictví, ale zde navíc při velkých objemech konstrukcí vystupuje do popředí požadavek nízké ceny, spojené se schopností přenášet v měnících se vnějších podmínkách často značná zatížení po dlouhou dobu mnohdy bez možnosti periodické kontroly a údržby.

Ceny základních materiálů pro kompozitní konstrukce (polymerní matrice, výztuž) jsou relativně vysoké (poměr hustoty ocele a polymerního vláknového kompozitu je ovšem zhruba 1:5 !) a z toho vyplývá potřeba pečlivého a ekonomického návrhu. Samotný návrhový postup je proti klasickým materiálům složitější a uvádí se, že i pět až desetkrát dražší. Proto mají z konstrukčních i výrobních důvodů největší výhodu modulové systémy, které minimalizují náklady na návrh, výrobu i dokončovací práce. Z výrobních procesů přicházejí v úvahu hlavně navíjení a pultruze, v poslední době se uplatňují i sofistikovanější procesy tváření s vakuově podporovaným transferem matrice.

V současné době se používají nejvíce VPK se skelnou výztuží. Nejčastěji jde o prvky splňující požadavky na korozní odolnost a konstrukce nemagnetické. Z výrobků navíjených jde zejména o různé typy cisteren a nádrží, nízko i vysokotlaká potrubí, ochranné konstrukce ve formě válcových skořepin a stožárů. Z pultruzních výrobků se nejvíce uplatňují chodníkové rošty do agresivního prostředí a nemagnetické konstrukční prvky jako žebříky, police, hrazdy, žebřiny kozy, ohrady, ploty. Významný podíl uplatnění VPK ve stavebnictví tvoří pruty, mříže, výztužné a předpínací kabely, základové kotvy a kotevní kabely opěrných a zárubních stěn. Stále více se jako výztuž uplatňují i uhlíková a aramidová (např. Kevlar od fy Du Pont) vlákna.

V České republice jsou tuzemskými výrobci v současné době (viz Internet) nabízeny pro technické obory následující výrobky z VPK:

stavebnictví - stříšky nad dveře, markýzy, zastřešení, bednění, sloupy stojany, obklady, parapety, desky kuchyňských linek, dřezy, umyvadla, patice pro sloupy veřejného osvětlení a další

chemický průmysl – potrubí, nádrže, komíny, žumpy, septiky, zásobníky, jímky sila, tanky, bazény, poklopy, šachty, kanály, plata, žlaby, odstředivě litá potrubí, plynové lahve a další

automobilový průmysl – modely, formy, prototypy, spoilery, spací nástavby, různé díly pro automobily, tramvaje a vagony, kapotáže

letecká doprava – ultralehká letadla

Dále jsou z VPK v České republice vyráběna protetika (protézy a náhrady), kryty antén, různé přepážky a řada výrobků pro volný čas jako jsou skluzavky, tobogany, bazény, mantinely, masky, helmy, pádla hokejky, lodě, skokanská prkna, šlapadla a další.

Cílem této práce je pokus připravit pro zájemce o kompozitní materiály hrubý přehled o jejich složení, základních vlastnostech a aplikacích zejména ve stavebnictví. Přehled vychází ze souhrnných prací [1] - [4], které rámuji výsledky dosažené v této oblasti v posledním desetiletí 20. století. Nejnovější poznatky získané v jednotlivých dílčích oborech zaměřených na kompozitní materiály a hybridní konstrukce nejsou do přehledu zahrnuty. V dalším textu jsou základní informace o VPK obsažené v úvodní části rozvedeny šířeji.

Vlákna a matrice

Vlákenné výztuže jsou dostupné ve všech geometrických formách od lineární přes plošné až k prostorovým. Vlákna mají daleko vyšší pevnost v tahu než příslušný materiál v kompaktu. Pro VPK mají největší význam vlákna skleněná, uhlíková a aramidová (např. kevlarová od fy Du Pont). Polymerní matrice slouží zejména k fixaci vlákenné výztuže do požadovaného geometrického uspořádání, přenáší zatížení do výztuže, brání destruktivním deformacím výztuže v místech tlakového zatížení a chrání výztuž od působení škodlivých vlivů. Základní rozdělení polymerních matric na termoplastické a termosetické určuje schopnost jejich opětovného roztavení do taveniny při zvýšení teploty nad hodnotu teploty skelného přechodu. Jako matrice jsou dosud v převážné míře používány termosetické matrice. Nejlevnější jsou nenasyčené polyesterové pryskyřice (UP), jejichž viskozitu lze ovlivňovat podílem reaktivního rozpouštědla (levného styrenu), ztužujícími přísadami a plnivý. Dobu vytvrzování lze měnit v širokém rozsahu volbou vytvrzovacího systému a vytvrzovací teploty. Krátké doby vytvrzování se s výhodou používají při hromadné výrobě. Obvyklý poměr objemového podílu vláken (sklo) a matrice je 0.65/0.35. Kompozit je vhodný pro nenáročné aplikace. Chemicky i tepelně odolnější jsou vinylesterové pryskyřice (VE) (mají vysoké hodnoty kritického přetvoření). Nejlepší mechanické vlastnosti s dostatečnou chemickou i teplotní odolností mají epoxidové pryskyřice (EP). Fenolické (fenolformaldehydové) pryskyřice mají vynikající odolnost ohni a vykazují při hoření nízký vývin toxických zplodin a kouře (využití pro prvky hromadných dopravních prostředků). Největší tepelnou odolnost mají pryskyřice na bázi imidových polymerů (bimaleimidů (BMI), termosetické polyimidů (PI)). V hromadné výrobě se používají zejména z ekonomických důvodů stále více polotovary s termoplastickými maticemi (krátký výrobní cyklus, nevytvrzují se). Nejlevnější je polypropylen (PP), dražší polyamidy (PA) a lineární polyestery (polyetylentereftalat (PET), polytetrametylentereftalát (PBT)). Chemicky a tepelně velmi odolné termoplasty jsou

polyfenylensulfidy (PPS), termoplastické polyimidy (polyamidoimid (PAI), polyetherketony (PEK). Maximální teplota použití však nepřesahuje 300°C. V mostním stavitelství se v kombinaci s vláknovými výztužemi používají i klasické cementové matrice (prostý beton s maximální velikostí zrn do 4 mm).

Trvanlivost vláknových polymerních kompozitů

Požadavky na trvanlivost vláknových polymerních kompozitů v technických aplikacích závisí na druhu a účelu jejich použití. Pro stavební konstrukce má zřejmě největší význam odolnost proti vlivům klimatu (mrznutí a rozmrzání, vlhkost, UV záření, u mostních konstrukcí rovněž odolnost vůči rozmrazovacím solím). Dosud otevřeným problémem zůstává dlouhodobá odolnost nejvíce používané skelné výztuže proti působení alkálií (beton). Jen uhlíková vlákna jsou obecně považována za rezistentní.

Vláknové polymerní kompozity a trvale udržitelný rozvoj

V současné době převládá názor, že VPK jsou z hledisek trvale udržitelného rozvoje srovnatelné s klasickými materiály. Skelné výztuže je možno považovat za ekologické, nezatěžují životní prostředí, suroviny pro jejich výrobu (křemenný písek, vápenec) jsou prakticky nevyčerpatelné, samotné sklo lze snadno recyklovat. I energeticky jsou VPK se skelnou výztuží výhodné, neboť spotřebují k výrobě 1/4 množství potřebného pro ocel a 1/6 energie nutné k výrobě téhož množství hliníku. Cenu uhlíkových vláken ovlivňuje relativně vysoká spotřeba energie. V současné době převládá pro VPK používání termosetických matic (polyester, epoxid), které po spojení s vlákny se dají recyklovat jen částečně (jako granulace plniv). Výzkumem podporovaný přechod k termoplastickým maticím znamená možnost opětovného roztavení a recyklace. Tato skutečnost má ohromný význam pro podporu používání fosilních paliv jako zdrojů surovin pro výrobu VPK.

Struktura kompozitního materiálu

Struktura kompozitního materiálu je definována vlastnostmi jeho složek (zejména těch základních s výrazně odlišnými charakteristikami), jejich hmotnostním nebo objemovým poměrem, prostorovým uspořádáním a povahou interakcí mezi nimi. Makrostrukturu polymerní matrice, tj. strukturní útvary vzniklé při krystalizaci, tuhnutí nebo dalších technologických procesech lze pozorovat pouhým okem nebo lupou. Polymery mají charakteristickou mikrostrukturu v případě, že při tuhnutí z taveniny krystalizují. Schopnost krystalizace je u polymerních materiálů závislá na pravidelnosti geometrického uspořádání postranních substituentů makromolekul (ataktický polymer má nahodilé uspořádání a je v tuhém stavu amorfní (polystyren), izotaktický (polypropylen) krystalizuje), na ohebnosti makromolekul (závisí na rotaci okolo jednoduché vazby -C--C-) a na míře jejich linearit. S většími postranními substituenty je rotace nesnadnější, nejobtížnější je s benzenovými jádry v hlavním řetězci (aromatický uhlovdík). Polymery s malou možností rotace kolem jednoduché vazby krystalizují buď do nízkého stupně nebo jsou zcela amorfní (polykarbonát). V závislosti na podmínkách polymeračních reakcí vznikají makromolekuly lineární, rozvětvené nebo sesíťované. Základním mikrostrukturním tvarem semikrystalických polymerů je sférolit. Má složitou strukturu, vedle množství drobných krystalů (lamelární krystality) obsahuje i amorfní oblasti. Stejně jako hranice zrn v kovech, ovlivňují i hranice mezi sférolity deformační a lomové chování polymeru. Podél hranice se oddělují při krystalizaci příměsi (nečistoty) a nekystalizující nízkomolekulární látky.

Základní údaje o mechanických, fyzikálních, chemických a technologických vlastnostech polymerních kompozitů

Významným vnějším projevem struktury materiálu jsou jeho vlastnosti mechanické, fyzikální, chemické a technologické. Mezi základní **mechanické vlastnosti** patří pružnost, pevnost, plasticita a houževnatost. Další důležité mechanické vlastnosti jako tvrdost, odolnost proti únavě, rázovému zatížení a tečení jsou považovány za odvozené pro určité podmínky namáhání.

Z **fyzikálních vlastností** polymerních kompozitů jsou pro aplikace nejdůležitější odolnosti vlivům teploty, vlhkosti a světelného záření, jejich elektrická vodivost (konduktivita) a měrný odpor (rezistivita).

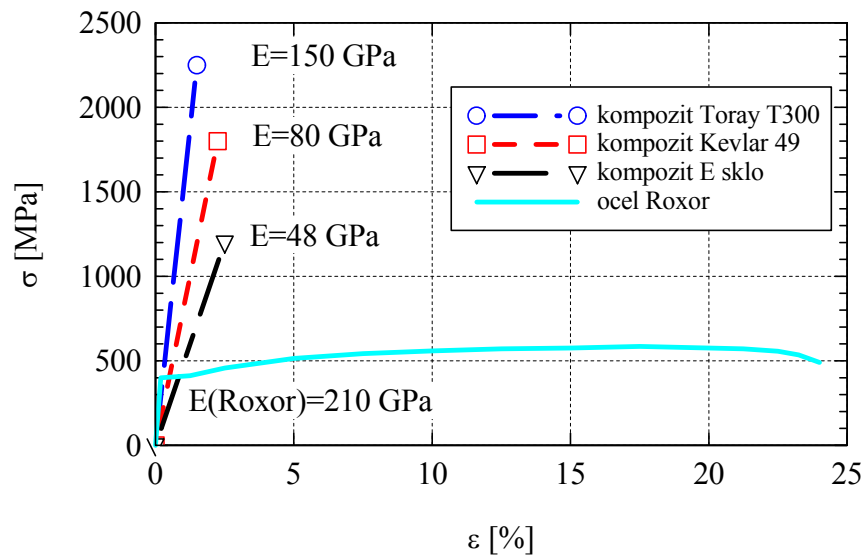
Chemické vlastnosti materiálů jsou určovány jejich schopností chemicky reagovat s okolním prostředím (kapalným, plynným). Chemické reakce vedou vždy ke změně chemického složení a téměř ve všech případech i k zhoršení užitných vlastností. Chemická reaktivita má proto rozhodující význam pro korozní procesy, tj. pro postupné znehodnocování materiálů účinkem vnějšího prostředí. Pro posuzování životnosti je důležitá rychlost chemických reakcí, neboli jejich **reakční kinetika**. Vyjadřuje se jako úbytek hmotnosti výchozí látky nebo přírůstek hmotnosti reakčního produktu v jednotce objemu za určitý časový interval. U polymerů nedochází k **elektrochemické korozi**, ale VPK s uhlíkovými vlákny v kontaktu se slitinami Al, Zn a Mg mohou vytvářet katodu elektrochemického článku a působit rozpouštění kovů. O rychlosti poškozování polymeru nízkomolekulární látkou rozhoduje rychlost difuze a vzájemná chemická reaktivita. **Difuze** může probíhat jako čistě fyzikální proces – makromolekuly jsou difundující látkou oddalovány, polymer **bobtná**, měkne a stává se méně pevným. Napětí mezi různě nabobtnanými částmi (povrch a kompak) způsobuje vznik trhlinek. Spolupůsobení mechanického zatížení způsobuje tzv. **korozí pod napětím**. Některé kapaliny a plyny usnadňují vznik křehkých trhlinek i u jinak houževnatých polymerů. Ty se vyvíjejí v přetvořených zónách (křejzy, pukliny), obsahujících i pevné polymerní fibrily a dutiny, které oddalují rozvoj křehkého lomu. Nízkomolekulárním látkám s uvedeným účinkem na polymery se říká **tenzoaktivní látky**. Při chemických reakcích může dojít ke štěpení vazeb makromolekul (ztrátě pevnosti), případně zabudování nových skupin do makromolekul polymeru, který následně tvrdne a křehne. Obecně lze říci, že kinetika chemických reakcí polymeru s agresivním prostředím je podobná jako u nízkomolekulárních látek se stejnými skupinami atomů.

Technologické vlastnosti materiálu charakterizují jeho vhodnost k určitému zpracovatelskému procesu, který vede k produkci bezvadného výrobku. Technologické zkoušky napodobují proces výroby a určují podmínky pro použitelné technologie.

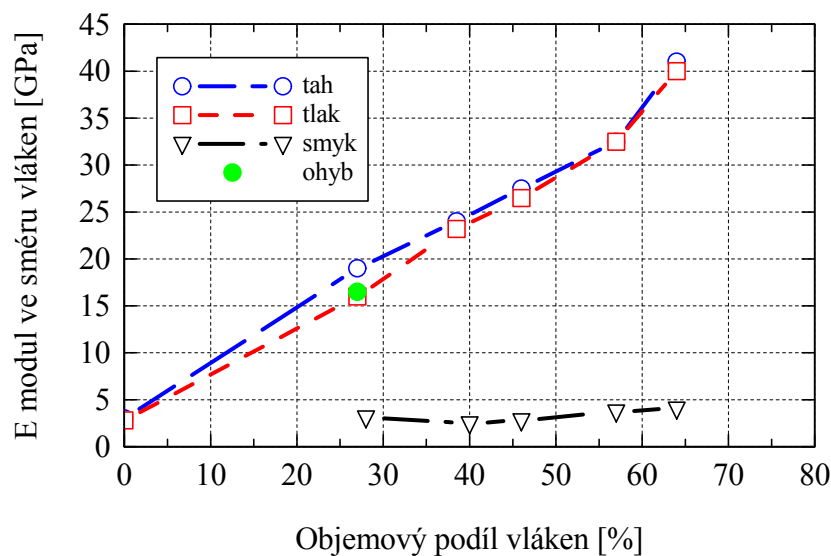
Pružnost a pevnost jednosměrných VPK

VPK nejsou homogenní, jejich vlastnosti jsou závislé na mnoha faktorech, z nichž nejdůležitější jsou typ výztužných vláken, jejich kvantita (objemový podíl) a míra jejich zakřivení. Obrázek 1 ukazuje, že jejich chování v jednoosém tahu je až do poruchy pružné a na rozdíl od ocele nevykazují mez kluzu ani plasticitu. Plocha pod pracovním diagramem, která je měřítkem práce spotřebované na porušení je relativně malá ve srovnání s mnoha konstrukčně významnými kovy. Tato skutečnost představuje jednu z nevýhod VPK – nemají možnost přizpůsobit se velkým lokálním napětím rozvojem plastické deformace. Na druhé straně ovšem i návrh kovových konstrukcí obvykle nepřipouští větší poměrné deformace než

0.5%. Vliv objemu vláken na modul pružnosti jednosměrně vyztužených VPK je znázorněn pro kompozit E sklo/polyester a základní mechanické zkoušky na obrázku 2.



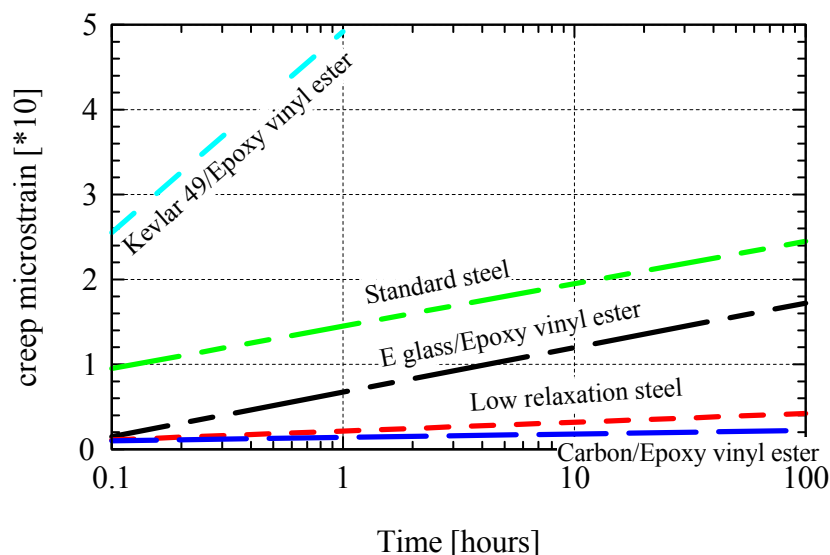
Obr.1 Typické pracovní diagramy jednosměrných kompozitů ($V_f=65\%$) a ocele Roxor.



Obr.2 Závislost modulu ve směru vláken na objemovém podílu vláken (jednosměrně vyztužený kompozit E sklo/polyester)

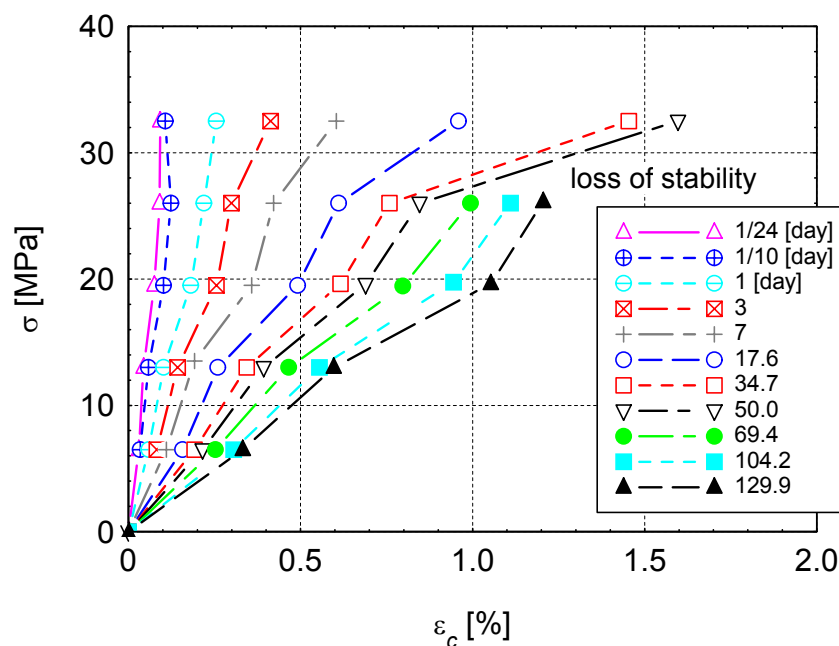
Tečení, relaxace, dlouhodobé chování

Polymery jsou typické vazkopružné materiály vykazující při stálém zatížení časově závislou deformaci (tečení, creep) a při konstantní deformaci časově závislý pokles napětí (relaxaci). Na druhé straně, výztužná vlákna jsou prakticky pružná až do vysokých hodnot napětí či teploty. Dlouhodobé mechanické chování VPK tedy závisí na tom, která s uvedených vlastností dominuje. Snahou konstruktérů je časový faktor z mechanického chování VPK vodným uspořádáním výztuže vyloučit. Tato situace je velmi jednoduchá u jednosměrně vyztužených kompozitů zatížených tahem ve směru vláken.

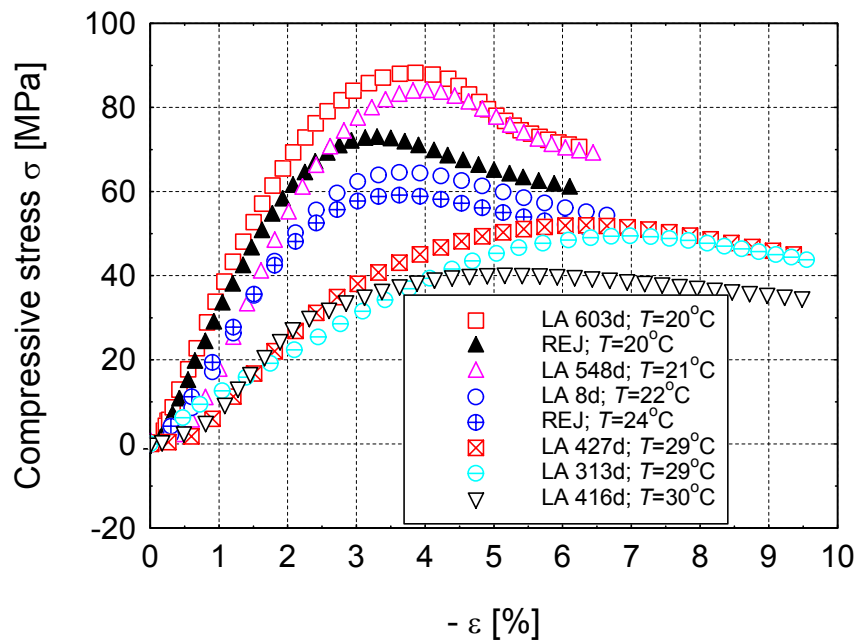


Obr.3 Srovnání creepu jednosměrně vyztužených pultrudovaných VPK ($V_f=62\%$) s ocelmi

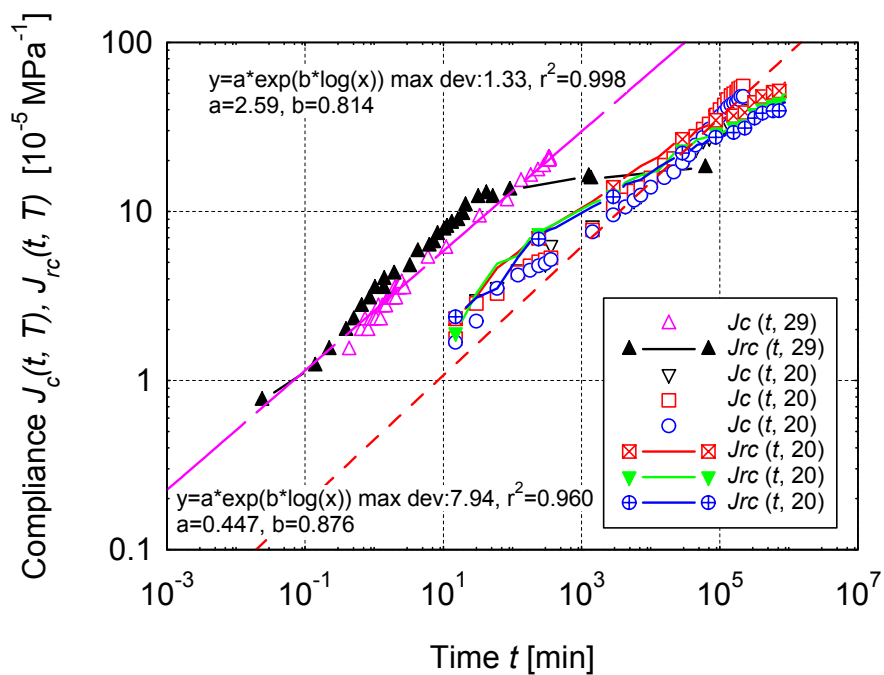
Obrázek 3 ukazuje, že chování uhlíkového kompozitu s vinylesterovou matricí je v tomto případě srovnatelné s chováním oceli s nízkou úrovní relaxace napětí a kompozit se stejnou matricí a skleněnými vlákny vykazuje stejnou rychlost změny přetvoření s časem jako standardní ocel. Z obrázku je rovněž patrné, že aramidová vlákna vykazují i v této jednosměrné konfiguraci, nehlédě na vysokou pevnost v tahu (1200-1400 MPa), řádově vyšší rychlost časově závislých změn deformace. S aramidovými vlákny je nutno při návrhu výztuže obezřetně zacházet i pro nízkou hodnotu meze kluzu při zatížení tlakem (jen 230 MPa – nehodí se na ohýbané konstrukční prvky). V nepříznivějších případech zatížení, ve kterých dominují mechanické vlastnosti matrice, např. při zatížení nekolineárním se směrem výztuže (zejména kolmém), při smykovém zatížení nebo při zatížení za vyšších teplot je třeba posouzení vlivu vazkopružných vlastností polymerních matric věnovat odpovídající pozornost. Vliv reonorních vlastností polymerní matrice na mechanické charakteristiky dokumentují obrázky 4 – 7.



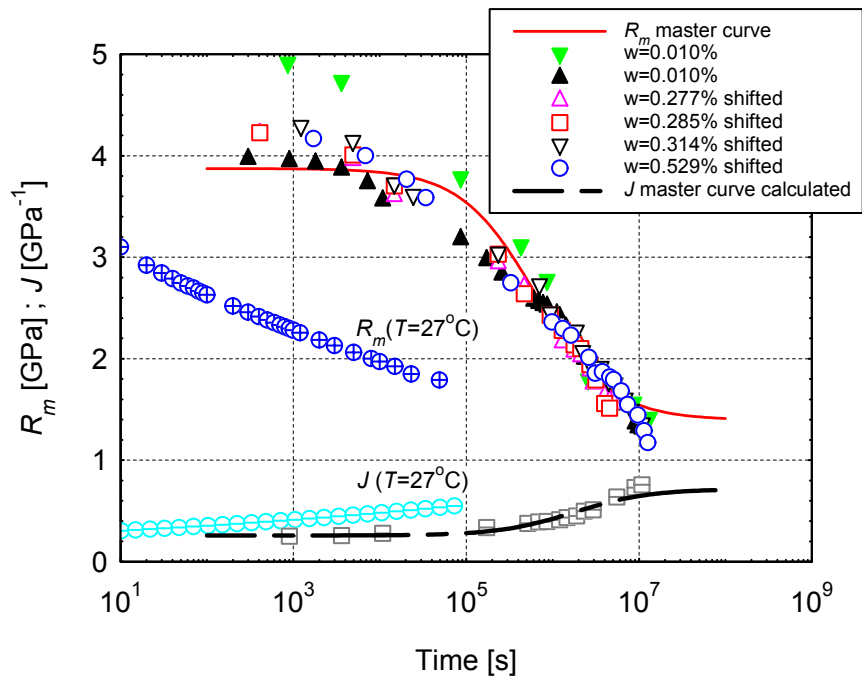
Obr.4 Isochronní pracovní diagramy ($T=20^{\circ}\text{C}$, epoxidová kompozice Comflor)



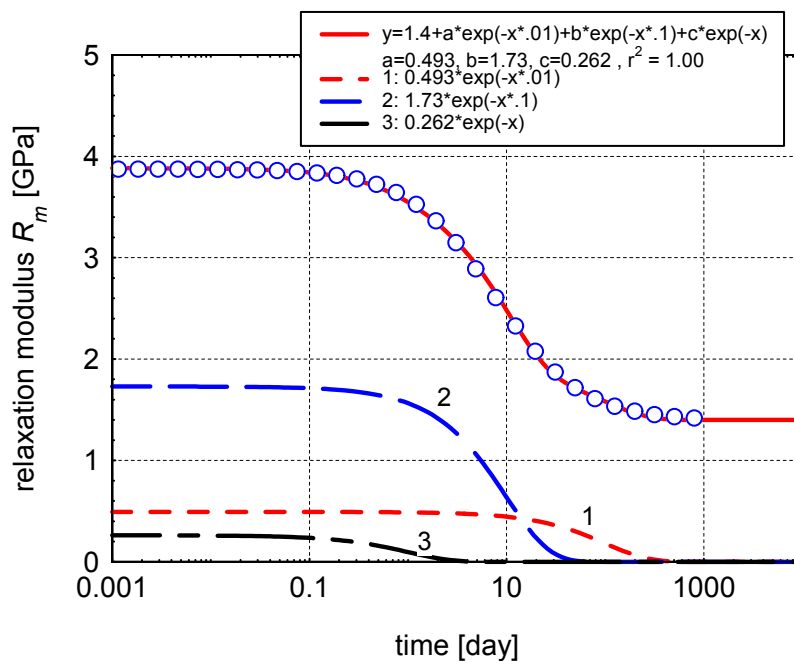
Obr.5 Vliv teploty a stárnutí v laboratorních podmínkách (LA) na mez pružnosti, přetvoření na mezi pružnosti a tuhost (epoxidová kompozice Comflor). REJ (rejuvenation) označuje zahřátí vzorku na teplotu 80°C po dobu 4 hodin a pozvolné ochladnutí na teplotu zkušební.



Obr.6 Vliv teploty T na vazkopružnou poddajnost $J_c(t, T)$ a vazkopružnou poddajnost při zotavení $J_{rc}(t, T)$ (epoxidová kompozice Comflor)



Obr.7 Okamžitý relaxační modul $R_m(t, 20^\circ\text{C})$ stanovený užitím principu superposice čas-vlhkost, odpovídající hodnota vazkopružné poddajnosti $J(t, 20^\circ\text{C})$ a tytéž hodnoty pro teplotu $T=27^\circ\text{C}$ (epoxidová kompozice Comflor)



Obr. Relaxační modul $R_m(t, 20^\circ\text{C})$ jako součet tří členů Pronyho řady

Rázové zatížení

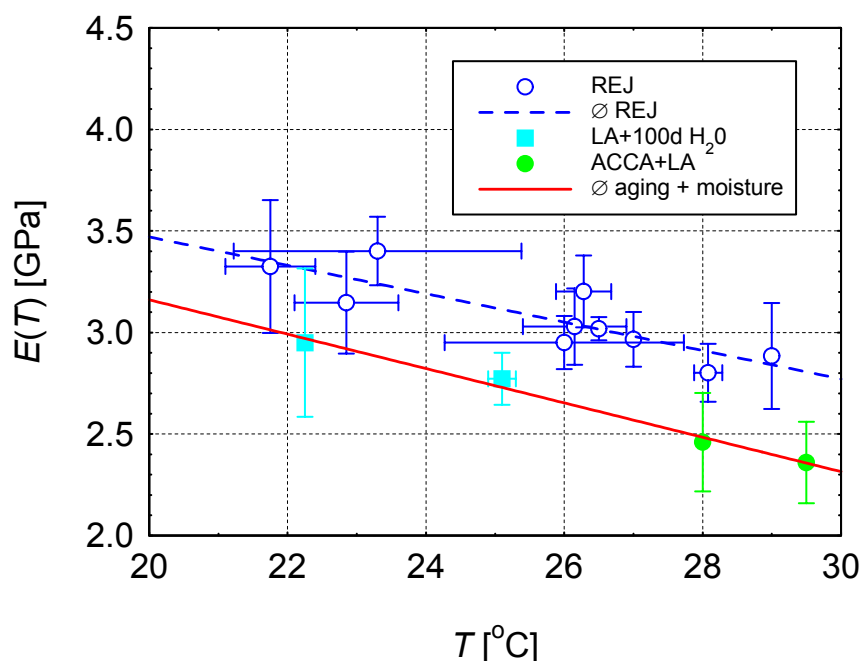
Kompozity s uhlíkovými vlákny mají vzhledem k vlastnostem výztuže (pružné chování, kritická poměrná deformace do 1.5%) velmi omezenou schopnost absorbovat energii rázu. Kompozity se skelnou výztuží jsou na tom lépe, jejich odolnost rázu je srovnatelná s ocelí i hliníkem. Nejlepší odolnost balistickému rázu vykazují VPK s aramidovými vlákny. Jejich výhodou je nízká poměrná hmotnost a vysoké hodnoty kritického přetvoření v tahu.

Únava

Únavové vlastnosti VPK vyztužených uhlíkovými vlákny jsou ve srovnání s klasickými materiály vynikající. Skelná vlákna mají ve srovnání s uhlíkovými nižší modul pružnosti, což má za následek vyšší hodnoty přetvoření kompozitu a snížení únavové životnosti. VPK s aramidovými vlákny mohou mít podle druhu opakovaného zatížení velmi rozdílnou odolnost vůči únavě – pro tahová zatížení lepší než kompozity se skelnými vlákny, pro zatížení ohybem v důsledku horších vlastností při zatížení tlakem velmi nízkou.

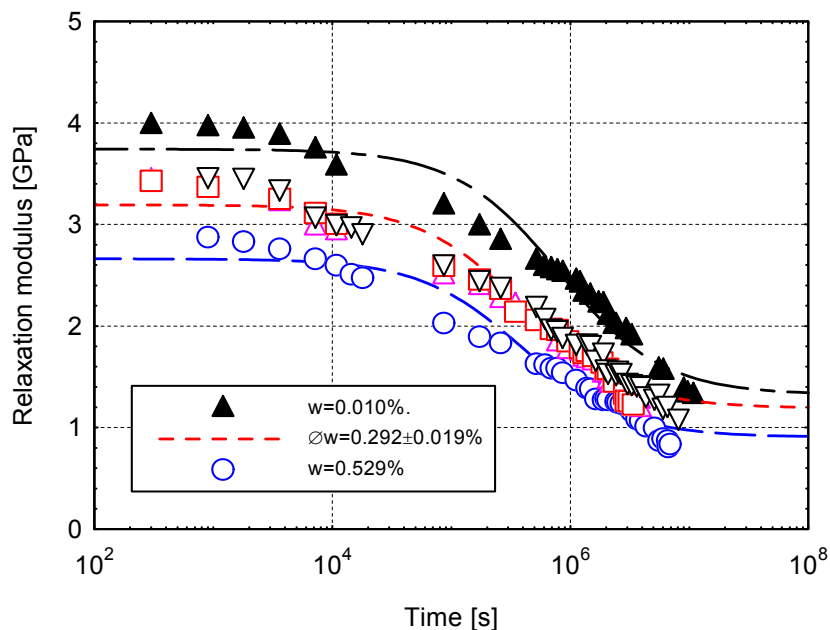
Vlivy okolí

Teplotní vlivy: Limitujícím faktorem jsou vlastnosti matrice. Nízké teploty snižují ohebnost polymerů a mohou způsobit jeho poškození při zatěžování. Významně nepříznivější jsou teploty vyšší. Nad teplotou skelného přechodu (T_g) se dramaticky mění vlastnosti a chování polymerní matrice, takže pro většinu aplikací je tato teplota hraniční. Vyztužná vlákna zvyšují hodnotu T_g kompozitu.



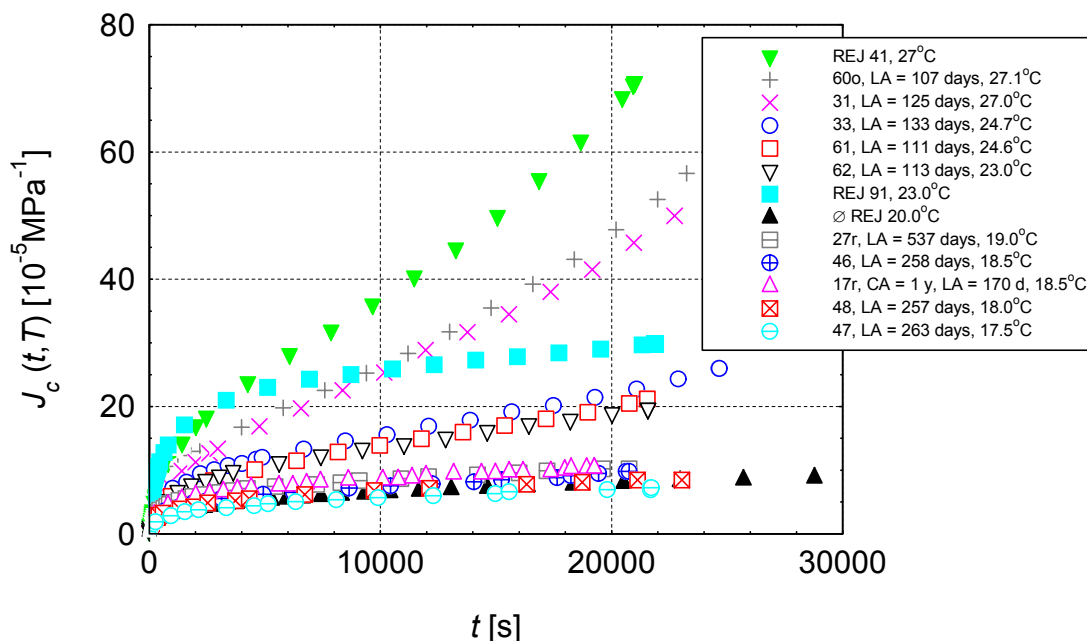
Obr. Vliv teploty, stárnutí a vlhkosti na hodnoty okamžitého relaxačního modulu (epoxidová kompozice Comflor). ACCA označuje urychlené stárnutí za definovaných podmínek.

Vliv vlhkosti: Vlhkost penetruje všechny organické materiály difusním procesem, který probíhá až do rovnovážného stavu. Výsledkem je snížení T_g polymerní matrice a redukce jejich mechanických vlastností. *Puchýřkování* se projevuje u polyesterových laminátů vyztužených skelnými vlákny při dlouhém styku s vodou. Soli přítomné ve vodě mohou způsobit vznik osmotického procesu, tj. průniku vody přes polopropustné membrány v místech trhlinek či dutinek a v konečném stadiu vznik puchýřků. *Erose dešťovými kapkami* je významná v případě velkých relativních rychlostí kapek vůči kompozitní konstrukci (např. v letectví).



Obr. Průběh hodnot relaxačního modulu pro tři různé obsahy vlhkosti w [%] při teplotě $T = 20^\circ\text{C}$ (epoxidová kompozice Comflor)

Stárnutí: Tímto označením se shrnují všechny nepříznivé vlivy okolí na vlastnosti a chování VPK. Nejvýznamnější mechanismy jsou zde vyluhování některých chemických složek z matrice, působení slunečního světla na matrici způsobující její zkřehnutí a eroze matrice vlivem její degradace a působení částic nesených okolím (vzduchem).



Obr. Vliv stárnutí na hodnoty vazkpružné poddajnosti (epoxidová kompozice Comflor)

Úder bleskem: VPK vyztužené uhlíkovými vlákny jsou více náchylné úderu bleskem než konstrukce hliníkové. Tato skutečnost je zvláště významná v letectví, kde může dojít k poškození konstrukce nebo k vyřazení elektronických zařízení nezbytných pro řízení letu. Nejobvyklejší metodou ochrany je metalizace povrchu uhlíkového kompozitu nástřikem nebo zabudováním tenké vrstvy obsahující hliník.

Galvanická koroze: I tento způsob poškození konstrukce se týká pouze VPK vyztužených uhlíkovými vlákny, které jsou lepším vodičem než některé kovy. Proto v kontaktu s některými z nich (jsou více anodické) může probíhat koroze. Urychlujícími podmínkami jsou krátká vzdálenost (např. spoje) a vhodný elektrolyt (vodní roztok).

Koroze pod napětím: Týká se zejména VPK vyztužených skelnými vlákny. Jde o mechanismus poškození kompozitu mechanicky zatíženého a vystaveného nepříznivému působení okolí (kyselé či zásadité povahy), kdy ke katastrofickému porušení může dojít za daleko nižších zatížení než při běžné mechanické zkoušce. Průběh koroze pod napětím je přímo závislý na odolnosti výtuzného systému vůči agresivnímu prostředí. Řešením je proto co nejvyšší ochrana vláken a volba odpovídajícího typu matrice.

Odolnost chemické korozi: Skelná vlákna odolávají nejrůznějším chemikáliím, ale jsou citlivá na působení slabých kyselin i zásad. Extensivní používání levných VPK se skelnou výtuzí (i v chemickém průmyslu) je proto založeno na dostatečné odolnosti použité matrice a schopnosti struktury chránit vlákna před účinky agresivního prostředí. Aramidová vlákna typu Kevlar mají velmi dobrou odolnost vůči neutrálním chemikáliím, silné kyseliny a zásady je napadají. Na druhé straně, japonská aramidová vlákna Technora uchovávají i za tohoto zatížení vysokou pevnost. Pokud jde o nejběžnější termosetické matrice, jejich odolnost se stupňuje v následujícím pořadí: nenasycené polyestery (ortoftalový, isoftalový a vinylester), bisfenol, epoxid.

Odolnost vůči ohni: Ve srovnání s betonem a ocelí je nízká (polyesterové matrice ztrácejí pevnost již při 100°C). Obecně jsou VKP hořlavé, ovšem dají se připravit materiály odolné vyšším teplotám (fenolické matrice) se sníženou hořlavostí, nevyvíjející při hoření toxické zplodiny. Díky nízké tepelné vodivosti je šíření tepla zhruba 200 krát pomalejší než u ocele. V případě potřeby je nutné k zvýšení odolnosti proti ohni provést konstrukční opatření.

VPK v mostním stavitelství

Používané polymerní matrice (polyester UP, epoxy EP)

Vlastnost	Jednotka	UP	EP
pevnost v tahu	MPa	20-70	60-80
Youngův modul	GPa	2-3	2-4
protažení při poruše	%	1-5	1-8
hustota	g/cm ³	1.2-1.3	1.2-1.3
teplota skelného přechodu	°C	70-120	100-270

Prvky tahové výztuže

Pásky, řemeny, pruty, kabely, kotvy. Jako plošná tahová výztuž se z praktických důvodů používají většinou jednosměrně vyztužené široké pásy, které se pokládají ve vrstvách různými směry podle potřeby.

Typické vlastnosti:

Pásky: pultrudované, jednosměrně vyztužené C vlákny, matrice epoxidová (i termoplastická!)
šířka 50-150 mm, tloušťka 1.2-1.4 mm
tahová pevnost 1300-2800 MPa, Youngův modul 165-300 GPa, protažení 0.45-1.7 %
lepení epoxidovými lepidly, vytvrzení zahřátím
používají se nepředepnuté i předepnuté pomocí originálního gradientového kotvení.

Vícenásobné řemeny: Nelaminované kolem dvou čepů vícenásobně vinuté řemeny vyrobené z jednosměrně C vlákny vyztužených pásků v termoplastické matrici mohou nahradit liniové prvky tahové výztuže. Umožňují relativní pohyb jednotlivých závitů a zakotvení je zatíženo jen částí celkové tahové síly.

Pruty a vícepramenné kabely: Kabely až z 37 pramenů, C vlákna v polymerní matrici,
tahová pevnost 1420-2000 MPa, Youngův modul 137 GPa
různé typy předpínacího kotvení, relaxace 0.7-2.5 % při 20 °C.

Jednosměrně vyztužené široké pásy: Jednosměrná výztuž skleněnými, uhlíkovými nebo aramidovými (vyšší odolnost zatížení rázem) vlákny, které jsou pre impregnovány matricí (2-3%) a umístěny na tenké síti ze skleněných vláken jako na nosiči
pevnost v tahu 2000-3500 MPa, Youngův modul 230-640 GPa, kritické deformace 0.3-1.5% (pro uhlíková vlákna).

Konstrukční části a systémy

Patří sem konstrukční části, které jsou tuhé na ohyb, tj. pultrudované profily a sendvičové prvky, které se ve stavebnictví převážně používají jako části mostovek. V závislosti na výrobci jsou vyráběny jako jednotlivé prvky nebo úplné systémy: profily a mostovky s různou technologií spojování, s integrovanými ocelovými průvodnicemi, upravenými povrchy.

Sendvičové panely

Jsou používány zejména jako prvky mostovky. Jejich hlavní předností je nízká váha (20 % srovnatelné betonové konstrukce), velká odolnost proti korozi a únavě a velmi rychlá instalace. Spojovací technologie je nejvýznamnější součástí návrhu. Převážně se používají šroubové spoje. Vzhledem ke své struktuře se VPK chovají elasticky prakticky až do svého porušení (nevytváří se lokální plastické zóny). Tato skutečnost způsobuje velké koncentrace napětí v matrici na okrajích otvorů pro spojování. I anisotropie mechanických vlastností působí negativně – síly působící napříč směru výztuže nelze prakticky odstranit. Proto patří oblasti spojů ke kritickým místům konstrukce, kterým je třeba věnovat zvýšenou pozornost i v průběhu služby.

Snímače integrované do materiálu

Lepené vláknové optické snímače jsou v současné době nahrazovány integrovanými, což technologie přípravy VPK umožňuje. Jejich výhodou je lepší spojení s měřenou částí, okolní materiál je současně chráněn, je možné monitorovat i fáze výroby a umožňují nepřetržité sledování vybraného prvku aniž by ovlivňovaly jeho vzhled.

Cementové matrice Beton vyztužený prvky VPK

Výztuž betonu prvky VPK zahrnuje použití krátkých vláken, textilu, prutů a vnitřních i vnějších předepnutých výztuží. Výztuž krátkými vlákny (polypropylen, polyamid, polyolefin, polyvinyl, uhlík) omezuje tvorbu trhlinek zejména v čerstvém betonu, únosnost konstrukce podstatně nezvyšuje. Výztuže betonu krátkými vlákny jsou součástí filosofie betonových mostovek bez ocele. Použití textilních výztuží v betonu je dosud ve stádiu vývoje. Použití výztužných prutů (z důvodu nízké ceny je snaha používat skelnou výztuž) je spojeno s potřebou ochrany před působením alkálií a velkých teplotních gradientů (v radiálním směru k výztuži mohou vznikat značná napětí). Tyto prvky vyžadují šetrné zacházení při transportu a ukládání a vzhledem k nízké specifické hmotnosti $1.3-1.9 \text{ kN/m}^3$ vyžadují fixaci proti „plavání“ v nezatvrdlé betonové směsi.

Předpjatá výztuž z VPK používaná v předpjatých nosnících a deskách betonových konstrukcí přináší vzhledem k oceli značné výhody:

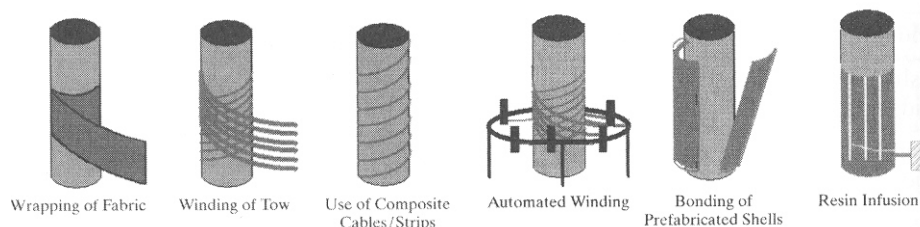
- vysokou odolnost korozi a únavě
- výhodný poměr pevnosti k vlastní váze (7 krát lehčí než ocel), snadnější instalace
- nižší ztráty předpětí z důvodu tečení a smrštění betonu (mají nižší Youngův modul)
- možnost monitorování optickými snímači

Budoucnost používání předpjatých výztuží z VPK závisí zejména na zlepšení systému jejich ukotvení. K hlavním problémům zde patří:

- omezená úroveň předpětí (50-60% pevnosti)
- omezené využití nosnosti kabelů, neboť kotvy se obvykle poruší dříve
- nebezpečí galvanické koroze mezi uhlíkovými vlákny a kovovými prvky konstrukce
- nedostatek informací o dlouhodobém chování
- nedostatek dat umožňujících stanovit reálnou cenu konstrukce tohoto typu se všemi náklady po dobu její životnosti.

Opravy a vyztužování

Značně rozšířenou aplikací VPK je jejich využití při obnově a zpevnování poškozených nebo konstrukčně již nevyhovujících staveb. Pro tyto účely se velice dobře uplatňují lepené laminátové desky a skořepiny, široké vyztužené pásy a textilie (hlavní nosníky mostů, mostovky, mostní obálky, ochrana proti vlivům prostředí), výztužné pásy, které se používají k ovinování lineárních konstrukčních částí (stožáry, komíny, pilíře, věže). V této funkci nahrazují VPK ocel a jsou při stejném výztužném efektu a mnohem větší korozi odolnosti až 28 krát lehčí. Některé konstrukční prvky lze zpevnit pouhou infuzí polymerní matrice.

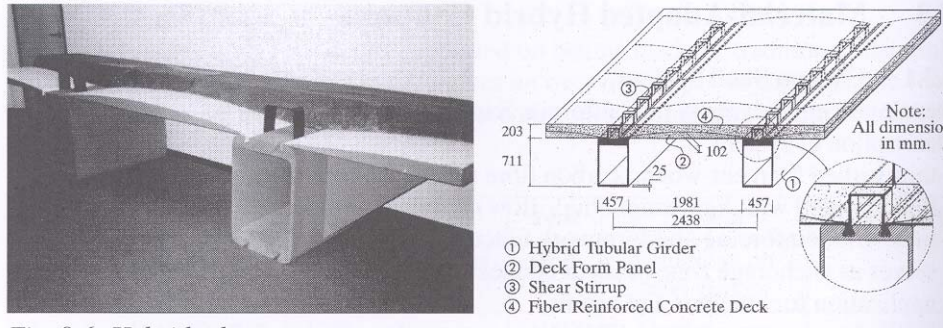


Obr. Metody zpevnování liniových konstrukčních prvků

Hybridní a celokompozitové konstrukce

Úplná náhrada klasických stavebních materiálů kompozitními snižuje vlastní váhu konstrukčních prvků a často tak umožňuje zvýšit hranici užitečného zatížení konstrukce. Tato

skutečnost se využívá především v mostním stavitelství výměnou mostovky, chodníků, zábradlí za kompozitové. Mostní opěry a pilíře se dále budou stavět z klasických materiálů. Hybridní konstrukce s materiálovou náhradou částí dosud převažují nad čistě kompozitovými konstrukcemi.



Obr. Příklad hybridní mostní konstrukce

Doporučení pro aplikace

Nejdůležitější témata pro budoucí aplikace VPK v mostním stavitelství se autor práce [2] snažil najít ve spolupráci s množinou odborníků v dané oblasti pomocí ankety. Výsledky této ankety (v procentech počtu odborníků, kteří se pro uvedený typ aplikace vyslovili) představují „kolektivní“ převažující názor na vývoj použití VPK v mostním stavitelství a přeneseně ve stavebnictví obecně. Aplikační možnosti byly rozděleny do tří časových intervalů: do 5 let, 5-15 let, 15-50 let. Pro nejkratší interval se předpokládá rozvoj aplikací zaměřených na:

- opravy a zpevnění (46%)
- náhradu betonových mostovek kompozitovými (21%)
- sekundární nenosné prvky konstrukcí (13%)
- lávky pro chodce (8%)

Pro střední interval aplikací ještě přibyly následující aplikace:

- menší celokompozitové mosty (8%)
- nové způsoby měření a monitorování (14%)
- předpjaté výztužné kabely (21%)

Nejdůležitější témata pro řešení problematiky použití VPK v nejdelším intervalu jsou následující:

- celokompozitové nebo hybridní konstrukce (65%)
- chytré konstrukce (samy sebe diagnostikující s inteligentními snímači a systémy snímač-ovladač) (15%)
- kabely z VPK pro zavěšené mosty (15%)

Návrhový proces

*Návrhový proces:
vyhledávací fáze, tvůrčí období a analytická část*

Zadání
TVAR
VELIKOST
MNOŽSTVÍ

*PROVEDENÍ
ČASOVÝ RÁMEC
ATD.*

*MOŽNÉ MATERIÁLY
VÝVOJ MATERIÁLU*

*MOŽNÉ TECHNOLOGIE
NOVÉ TECHNOLOGIE*

*Tvůrčí období
ZKUŠENOST
ODHAD, DOMNĚKA, ÚSUDEK
VYNALÉZAVOST, DŮVTIP
INTUICE
ZAUJATOST, PŘEDSUDKY*

MOŽNÉ GEOMETRIE

MOŽNÁ ŘEŠENÍ

ANALÝZA A SROVNÁNÍ MOŽNÝCH ŘEŠENÍ

OPTIMÁLNÍ ŘEŠENÍ

Závěr

Hlavní předností plynoucí z použití VPK v technických oborech jsou následující:

- Umožňují řešit problémy, které jsou při použití klasických materiálů řešitelné jen s obtížemi a nebo za vyšší cenu.
- Jejich použitím lze dosáhnout redukce nákladů na celou dobu životnosti konstrukce včetně inspekce a údržby. Umožňují vytváření inteligentních konstrukcí, které jsou schopny bez přerušování provozu monitorovat samy sebe a kontrolovat svou údržbu a opravy.
- Kompozitní materiály snižují energetickou spotřebu při výrobě.
- Nízká hmotnost všech polymerních kompozitových prvků znamená i nízké náklady na přepravu a manipulaci, přináší ekonomické výhody v dopravě, umožňuje řádově rychlejší vztyčení konstrukce a postup stavby, zvýšení únosnosti konstrukce i možné snížení nákladů na založení stavby.

Hlavním argumentem ve prospěch cíleného použití VPK ve stavebnictví a dalších technických oborech je tedy celková účinnost, účelnost a očekávaná životnost konstrukce ve srovnání s alternativními řešeními.

Použitá literatura:

- [1] Advanced Composite Materials in Bridges and Structures (ACMBS). Proceed. 1st Int. Conf., Sherbrooke, Québec, Canada, 1992. Editors: Neale, K.W., Labossiere, P. (705 pp., 65 papers, 136 authors from 13 countries).
- [2] Keller, T.: Use of Fibre Reinforced Polymers in Bridge Construction. Structural Engineering Documents. IABSE, No.7, 131 pp., 2003

- [3] Macek, K., Zuna, P. a kol.: Strojírenské materiály. Skripta ČVUT, Vydavatelství ČVUT, 2003
- [4] Quinn, J.A.: Composites – Design Manual. James Quinn Associates Ltd, 2002
- [5] Minster, J.: Mají špičkové kompozitní materiály ve stavebnictví budoucnost? Inženýrské stavby, ročník 41, 10/1993, 349-350
- [6] Minster, J. Použití kompozitních materiálů (zejména polymerních vláknových (Fibre Reinforced Polymers (FRP)) v mostních konstrukcích se zaměřením na kombinaci s plnostěnnými ocelovými I nosníky. Rešerše, 2006, nepublikováno
- [7] Minster, J., Hristova, Ju. (2005) Time-dependent response of an epoxy system to compressive loading. 10th Jubilee National Congress on Theoretical and Applied Mechanics, 13-16 September, Varna, Book of abstracts, 58-59; Proceedings, Volume I, Section 2 “Solid Mechanics”, Eds. Ivanov Ya., Manoach, E., Kazandijev, R., Prof. M. Drinov Publishing House, ISBN-10: 954-322-123-5, Sofia 2005, pp. 293-299 (Keynote lecture)
- [8] Minster, J., Hristova, Ju. (2006) Moisture effects on long-term relaxation and creep characteristics of an epoxy resin. Proceed. 11th International Conference on Mechanics and Technology of Composite Materials, Sofia, October 2-4 , 257-263