

KOMPOZITNÍ VÝZTUŽ DO BETONU – PERSPEKTIVNÍ MATERIÁL PRO ODOLNÉ A TRVANLIVÉ BETONOVÉ KONSTRUKCE ■

COMPOSITE REINFORCEMENT – PERSPECTIVE MATERIAL FOR RESISTANT AND DURABLE CONCRETE STRUCTURES

František Girgale, Jan Prokeš,
Ondřej Januš, Vojtěch Kostiha,
Petr Štěpánek

Příspěvek se zabývá návrhem a využitím moderních kompozitních materiálů ve formě vnitřních výztuží pro betonové konstrukce pozemních a inženýrských staveb. Využití těchto materiálů může být výhodné především při návrhu prvků vystavených vysokému environmentálnímu zatížení, případně v oblastech, kde jsou projektem na konstrukci kladeny specifické požadavky, jako např. netečnost vůči působení magnetického pole. V textu je stručně popsáno složení a výsledné chování kompozitní výztuže vystavené krátkodobému i dlouhodobému zatížení a též jsou uvedeny základní fyzikálně mechanické charakteristiky, které determinují návrh betonových konstrukcí vyztužených tímto moderním materiálem. Předkládaný text je první částí série článků s tematikou využití kompozitních materiálů v betonových konstrukcích. Sumarizuje základní dostupné informace a vytváří teoretický základ pro navazující články. ■ The presented article deals with design and use of advanced composite materials – an internal reinforcement for concrete structures. Utilization of these modern materials can be useful mainly in the case of design of members exposed to aggressive environmental conditions or in case where the project prescribes specific requirements such as indifference to the magnetic field. Composition and behaviour of the composite reinforcement exposed to a short and a long term load is briefly described in the text. The basic physical and mechanical characteristics, which determine the design of concrete structures reinforced with this modern material, are also introduced. This text is a part of the series of articles which topic is a utilizing of the composite reinforcement in concrete structures and, as a first part, it summarizes the basic available information to create a theoretical base for follow-up articles.

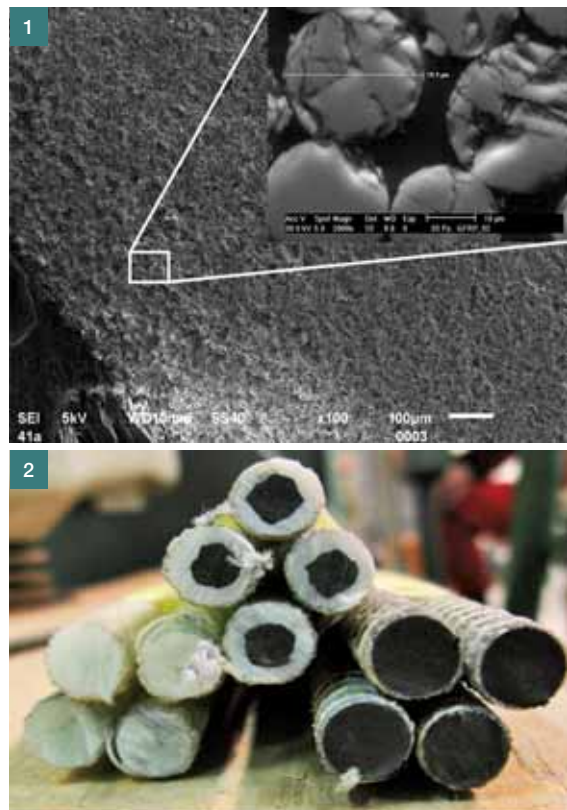
Kompozitní materiály (FRP – fibre reinforced polymer) byly díky velmi dobremu poměru únosnosti k své váze využívány především v leteckém a automobilovém průmyslu, kde v současnosti představují základní stavební prvek lehkých, úsporných a výkonných dopravních prostředků. V posledních dekádách

ovšem nacházejí kompozity širší uplatnění i ve stavebnictví, a to především jako materiály pro zesilování, ale též i při vyztužování nově budovaných betonových prvků. Rozšíření využití nekovových výztuží je dáno především výhodnými fyzikálně mechanickými a chemickými vlastnostmi tohoto materiálu, které otevírají nové oblasti návrhu odolných prvků – např. *fib* Model Code 2010 [6] již kompozitní výztuž uvažuje z hlediska návrhu jako rovnocennou alternativu k oceli.

Kompozitní výztuže mají oproti ocelovým výztužným vložkám především podstatně vyšší odolnost vůči agresivním chemikáliím (kyseliny, chloridy apod.), jsou korozivzdorné, velmi lehké, nevodivé a netečné k působení magnetického pole (nestíní radiový signál, jsou netečné vůči bludným proudům apod.) a mohou mít (s ohledem na zvolené složení) výrazně vyšší tahové pevnosti než klasické ocelové výztuže. Je zřejmé, že s ohledem na výše uvedené odpadá nutnost respektovat doporučení normativních podkladů (především [1]) z hlediska trvanlivosti, tj. především stanovení krycí vrstvy s ohledem na třídu prostředí.

Kompozitní výztuže, jako každý jiný konstrukční materiál, mají i svá omezení a negativa, která míru jejich využití v reálných aplikačních oblastech snižují. Mezi nevýhody patří především skutečnost, že jejich vlastnosti mohou být v dlouhodobém horizontu negativně ovlivněny zásaditým prostředím betonu. Podstatnou nevýhodou především levnějších kompozitních výztuží ze skleněných vláken je jejich nízký modul pružnosti (v porovnání s ocelí), který negativně ovlivňuje výslednou tuhost konstrukce. Mají také nižší odolnost vůči působení vysokých teplot.

Nespornou nevýhodou (především v očích investora) je pak pořizovací cena tohoto materiálu a nedůvěra v jeho chování v dlouhodobém časovém horizontu, což pramení především z nedostatku zkušeností. Z tohoto důvodu se článek pokouší shrnout a popsat základní krátkodobé i dlouhodobé materiálové vlastnosti kompozitní výztuže, uvést zkušenosti s tímto ma-



teriálem a též definovat limity jeho využití. Snahou je poukázat na skutečnost, že některé „počáteční“ nevýhody mohou být z velké části eliminovány zohledněním celého životního cyklu konstrukce (a tím i všech nákladů, které musí investor vynaložit během jejího provozu) a především volbou vhodné aplikační oblasti a správným návrhem konstrukce. Článek vychází ze zkušeností získaných nejen ze zahraničních zdrojů, ale i z vlastních zkušeností autorů nabytých při dlouholeté spolupráci při vývoji, testování a uvedení této moderní výztuže do praxe.

SLOŽENÍ A VÝROBA KOMPOZITNÍ VÝZTUŽE

Základním rysem kompozitních výztuží je spojení nosných vláken a polymerní matrice v jednom produktu. Kombinací těchto dvou složek vzniká materiál s jedinečnými vlastnostmi, které jsou dány především typem a vzájemným poměrem obou složek (typický řez FRP výztuží s viditelnou strukturou je na obr. 1).

V běžně dostupných FRP (fiber re-

Obr. 1 Snímky řezu FRP výztuže z elektronového mikroskopu, zvětšeno 100x (výřez 2000x)

Fig. 1 Pictures of FRP reinforcement section made by electron microscope, magnified 100x (cut-out 2000x)

Obr. 2 Různé druhy FRP výztuží (zleva GFRP, C-GFRP a CFRP)

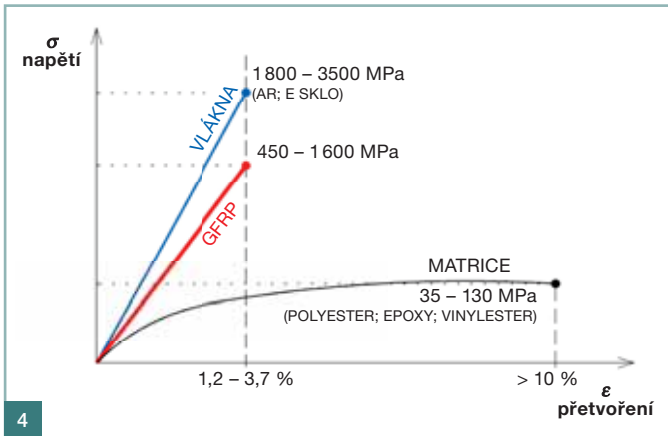
Fig. 2 Different types of FRP reinforcement (from the left: GFRP, C-GFRP and CFRP)

Obr. 3 Snímek pultruzní linky pro výrobu FRP výztuže

Fig. 3 Picture of the pultrusion line for FRP reinforcement production

Obr. 4 Příklad idealizované závislosti napětí na přetvoření GFRP výztuže včetně základních materiálů kompozitu

Fig. 4 Example of idealized stress-strain diagram of GFRP reinforcement including its elementary components



inforced polymer) výztužích mají dominantní zastoupení především vlákna skleněná (glass fiber reinforced polymer, GFRP) a uhlíková (carbon fiber reinforced polymer, CFRP). V praktických aplikacích je však možno se setkat i s jinými typy nosných vláken, např. čedičovými nebo kevlarovými. Vlákna tvoří základní nosný prvek kompozitu, který dominantně ovlivňuje vlastnosti v podélném směru (v případě výztužných prutů). Všechny uvedené typy vláken se při tahovém namáhání chovají lineárně pružně až do porušení. Podrobnosti o chemickém složení, výrobě a vlastnostech vláken jsou uvedeny např. v [2] nebo [3].

Matrice zajišťuje celistvost kompozitu, váže k sobě jednotlivá nosná vlákna, přenáší tahové namáhání z betonu do vláken a také je chrání před vlivem okolního prostředí a mechanickým porušením. Současně dává finální tvar kompozitu a společně s typem a množstvím použitých vláken určuje výsledné fyzikálně mechanické vlastnosti FRP výztuže. Při výrobě FRP výztuží jsou používány matrice na bázi organických (či anorganických) polymerů (řetězených molekul navzájem propojených chemickými vazbami), nejčastěji jsou využívány epoxidové, vinylesterové, příp. polyesterové pryskyřice.

Matrice je obvykle ve srovnání s vláknou výrazně poddajnější, její pevnost v tahu (i modul pružnosti) je u všech typů významně menší než pevnost v tahu vláken (u polymerních matic až o dva řády). Matrice jsou dobré izolanty

(nevedou tepelnou a elektrickou energii), ovšem při dlouhodobém konstantním napětí se dotvarovávají. Nejsou odolné vůči vyšším teplotám (např. [3], [4]) a důležitá je tzv. teplota skelného přechodu T_g , při které dochází k fyzikálně chemickým změnám ovlivňujícím mechanické vlastnosti matrice (matrice měkne).

FRP výztuže jsou vyráběny pultruzí, příp. kombinací pultruze a ovíjení. V průběhu výrobního procesu musí dojít k dokonalému spojení nosných vláken a matrice. Při klasické pultruzi jsou nejdříve jednotlivá nosná vlákna srovnána (aby bylo zajištěno jejich konstantní rozložení po průřezu), následně je výztuž kontinuálně impregnována tekutou pryskyřicí a vtahována do tvarovače. V ohřívací části vytvrzovací formy je pryskyřice vytvrzena a hotový profil je odtahován a řezán na potřebnou délku. Výše popsaný postup zmiňuje pouze základní části výroby, dále jsou obvykle doplněny technologické jednotky pro aplikaci požadované povrchové úpravy (např. opískování, ovíjení) apod.

FYZIKÁLNĚ MECHANICKÉ VLASTNOSTI VNITŘNÍ FRP VÝZTUŽE

Existuje mnoho modifikací a typů využívaných kompozitních výztuží určených pro aplikace jako vnitřní nepřepjatá výztuž do betonu. Základními rysy všech typů FRP výztuží – vyplývajícími z jejich fyzikální podstaty bez ohledu na využití typy vláken či matrice – jsou především:

- fyzikálně mechanické vlastnosti determinuje směsný poměr, vlastnosti dílčích součástí kompozitu (základní nosná vlákna, použitá matrice atp.) a postup výroby,
- ortotropní chování, tj. materiálové charakteristiky kompozitu dosahují rozdílných hodnot ve směru orientace nosných vláken a ve směru kolmém na tato vlákna,
- lineárně elastické chování s křehkým lomem při dosažení mezního napětí, které je patrné při namáhání ve směru vláken (pracovní diagram má vždy lineární průběh až do porušení),
- reologické chování výztuže závisí na okolním prostředí (teplota, vlhkost) a hladině a typu aplikovaného zatížení, tj. nejen na typu použitých vláken a způsobu výroby,
- z důvodu využití termosetických matic nelze výztuže po vytvrzení dále tvarovat, případné ohyby je třeba realizovat již při výrobě kompozitu.

S ohledem na značné množství komerčně dostupných FRP výztuží je třeba poznamenat, že jejich mechanické charakteristiky silně závisí na výrobním postupu a vstupních surovinách a jsou proto odlišné u každého produktu. Při návrhu konstrukce vyztužené FRP výztuží je proto nezbytné vycházet z aktuálních (příslušnými certifikačními orgány ověřených) údajů z technického listu výrobce.

Fyzikální vlastnosti

Pro návrh a provádění betonových konstrukcí vyztužených FRP výztuží jsou důležité především tyto fyzikál-

ní vlastnosti: hmotnost, teplotní roztažnost a reakce výztuže na působení zvýšených teplot.

Objemová hmotnost FRP výztuže je v porovnání s ocelí zhruba čtvrtinová až pětinnová, což ve srovnání s běžnou výztuží usnadňuje manipulaci na stavbě. Na tuto skutečnost je však nutno pamatovat při betonáži a výztuž v bednění fixovat proti nežádoucímu vyplavání. Běžně očekávané hodnoty pro objemový podíl vláken 50 až 75 % jsou uvedeny v tab. 1.

Ve srovnání s klasickou betonářskou výztuží, jejíž součinitel teplotní roztažnosti je při běžných teplotách přibližně shodný s betonem, FRP výztuž vykazuje odlišné chování. **Součinitel teplotní roztažnosti α FRP výztuže** je odlišný v příčném a podélném směru ($\alpha_{r,l}$ pro podélný směr; $\alpha_{r,r}$ pro příčný směr) a jeho hodnota závisí na objemovém podílu vláken a typu použité matrice. V podélném směru je součinitel určován vlastnostmi vláken, ve směru příčném pak vlastnostmi matrice. Hodnoty součinitele teplotní roztažnosti jsou uvedeny v tab. 1.

Z důvodu rozdílnosti hodnot teplotní roztažnosti betonu a CFRP výztuže v podélném směru vznikají v konstrukci (a především ve výztuži samotné) přídatné síly, které by měly být zahrnuty do výpočtu. Jejich velikost je závislá na vlastnostech výztuže (při předpokladu kompatibility přetvoření na povrchu betonu a výztuže rozhoduje především modul pružnosti materiálu). S ohledem na hodnoty uvedené v tab. 1 je zřejmé, že nebezpečné jsou především situace, kdy rozdílná tepelná roztažnost obou materiálů generuje přídatné tahové síly ve výztuži.

Krátkodobé mechanické vlastnosti

Pevnost v tahu

Základními charakteristikami popisujícími krátkodobé chování FRP výztuže jsou modul pružnosti $E_{r,l}$ (uvážený obvykle ve střední hodnotě), mezní pevnost v tahu $f_{r,l}$ (střední (index m), charakteristická (k), návrhová (d)); při vyhodnocení lze uvážit normální rozdělení četnosti, [7]) a mezní poměrné přetvoření $\varepsilon_{r,l}$ odpovídající dané pevnosti v tahu. Základní (očekávané) tahové pevnosti FRP výztuže jsou uvedeny v tab. 1.

FRP výztuž vyráběná pultruzí vykazuje nejvyšší tahovou pevnost a modul pružnosti při osovém namáhání ve

směru vláken, odklon směru namáhání od podélné osy způsobuje snížení únosnosti výztuže (ortotropní chování výztuže). Únosnost výztuže dramaticky klesá při odklonu výslednice od osy větším než cca 10 až 15° [5]. Je proto výhodné navrhovat FRP výztuž namáhanou pouze centrickým tahem bez kombinace účinku příčné (smykové) síly. V opačném případě dochází k odklonu směru namáhání od podélné osy výztuže a je nutno tuto skutečnost při určení únosnosti FRP výztuže zohlednit.

V případě návrhu ohýbané výztuže je dle [5] nutno z důvodu nehomogeneity rozprostření vláken a jejich nestejnoměrného využití při vnášení zatížení uvažovat s redukcí tahové pevnosti na cca 40 až 50 % původní hodnoty přírodního prutu. Přesná hodnota závisí především na poměru poloměru ohybu k průměru výztuže [8]. Redukční vztah lze uvažovat ve tvaru:

$$f_{td}^b = \left(0,05 \frac{r_b}{\phi_f} + 0,3 \right) f_{td} \leq f_{td}, \quad (1)$$

kde f_{td}^b je návrhová pevnost FRP výztuže průměru ϕ_f v místě ohybu o poloměru r_b . Vztah (1) vychází z [8] a v nezmeněné formě jej uvádí i směrnice [7].

Pevnost v tlaku

V současnosti není doporučeno uvažovat při návrhu betonových konstrukcí s tlakovou únosností FRP výztuže (např. [5], [7]). Chování v tlaku a tahu je odlišné. V tlaku je dosahováno obecně nižších modulů pružnosti i mezních pevností a závislost napětí na přetvoření není lineární. Určením krátkodobých mechanických charakteristik FRP vý-

ztuže v tlaku se zabývá několik vybraných zahraničních prací, ovšem – především z hlediska popisu dlouhodobého chování – nejsou doposud k dispozici relevantní údaje, které by umožňovaly bezpečný návrh.

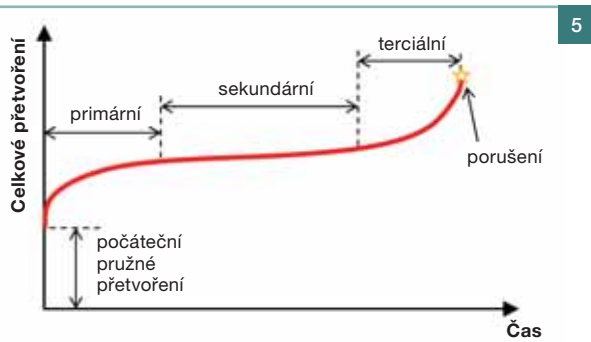
Soudržnost

Zajištění spolehlivého spolupůsobení FRP výztuže s okolním betonem je v případě klasického kotvení výztužných prutů soudržností zcela klíčové pro návrh betonových prvků vyztužených tímto materiálem. Mechanismus přenosu zatížení z betonu do výztuže ovlivňuje chování konstrukce – průhyb, šířku a vzdálenost trhlin, potřebnou minimální tloušťku krycí vrstvy a především nutnou kotevní délku. Soudržnost je závislá zejména na povrchové úpravě výztužných vložek, mechanických charakteristikách samotné výztuže (modul pružnosti, typ matrice apod.) a vnějších podmínkách (teplota apod.), které mohou její výslednou hodnotu ovlivňovat negativně.

Soudržnost FRP výztuže je zajištěna chemickou adhezí (tj. přenosem smykových sil ve styku dvou povrchů bez zřetelného pohybu), třením (vlivem drsnosti povrchu výztuže) a mechanickým zaklíněním (zejména u výztuže se žebírkou). Rozdílné povrchové úpravy FRP výztuží determinují chování kontaktu – opískované pruty vykazují při dosažení maximálního napětí v soudržnosti významně menší pokluz než pruty s povrchovou žebírkovou úpravou, tj. duktilita při porušení je u opískovaných výztuží nižší (např. [9]). Tato úprava dovolu- je dosáhnout také nejvyšších napětí v soudržnosti, která jsou srovnatelná s běžnou ocelovou žebírkovou výztuží.

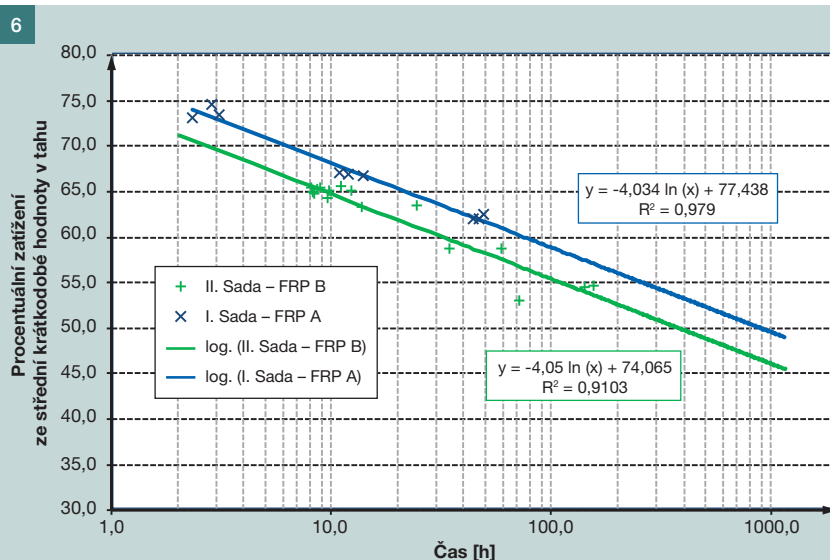
Tab. 1 Typické krátkodobé mechanické vlastnosti FRP vnitřních výztuží (platí pro objemové množství vláken $V_f = 50$ až 75 %; střední hodnoty) a jejich srovnání s betonářskou ocelí (zdroj: [5], [7] a vlastní výzkum [12]) ■ Tab. 1 Typical short-term mechanical properties of FRP reinforcement (volume of fibres $V_f = 50 - 70$ %; mean values) and their comparison with reinforcing steel (sources: [5], [7] and our own research [12])

Vlastnost	[Jednotka]	Materiál		
		Ocel (pasivní výztužné vložky)	GFRP	CFRP
modul v podélném směru	[GPa]	200	35 až 60	100 až 580
modul v příčném směru	[GPa]	200	cca 8 až 9	cca 10 až 12
tahová pevnost ve směru vláken	[MPa]	300 až 600	450 až 1600	600 až 3500
tlaková pevnost ve směru vláken	[MPa]	300 až 600	cca 1/2 z tahové pevnosti	cca 1/2 z tahové pevnosti
pevnost v čistém stříhu	[MPa]	200 až 400	cca 150	cca 175
objemová hmotnost	[kg/m ³]	7850	cca 2100	cca 1600
součinitel teplotní roztažnosti (L) – podélný, (R) – příčný směr	[10 ⁻⁶]	12	6 – 10 (L) 19 – 23 (R)	-1 – 0 (L) 22 – 50 (R)
teplota skelného přechodu T_g	[°C]	-	běžně 110 až 140°C	



Obr. 5 Idealizovaný nárůst deformace (dotvarování) FRP výztuže v závislosti na čase [5] ■ Fig. 5 Creep of FRP reinforcement in dependence on time – idealized behaviour [5]

Obr. 6 Ukázka závislosti mezní tahové pevnosti na čase porušení (tj. době působení zatížení), $T = 20\text{ °C}$ ■ Fig. 6 Example of dependence of the ultimate tensile strength on the exposure time; $T = 20\text{ °C}$



Uvedené závěry byly ověřeny i vlastním výzkumem.

S ohledem na rozdílnost chování různých povrchových úprav (i množství využitelných zkušebních postupů, [12]), a tím i značný rozptyl získaných mezních napětí v soudržnosti je nezbytné, aby přesné údaje byly specifikovány pro konkrétní typ výztuže/povrchové úpravy (včetně identifikace využitého zkušebního postupu). Projektant by měl tuto skutečnost uvážit při návrhu a předpoklady v rámci projektu definovat.

Dlouhodobé mechanické vlastnosti

FRP výztuže vystavené dlouhodobému působení zatížení vykazují nárůst deformace v čase – dochází k dotvarování výztuže – a mohou i při hladinách zatížení nižších, než je jejich krátkodobá tahová pevnost f_{td} , náhle selhat.

Průběh dotvarování v čase lze u kompozitních výztuží rozdělit do tří fází (obr. 5). Po vnesení zatížení a tomu odpovídající okamžité elastické deformaci proběhne během relativně krátkého časového intervalu po zatížení konstrukce časově závislá deformace (dotvarování) s klesající intenzitou, která je způsobena redistribucí působícího zatížení z „měkké“ matrice na nosná vlákna (podobný průběh lze nalézt u betonových a ocelobetonových prvků).

Redistribuce napětí z matrice do vláken je pro nízké hladiny přetvoření vratná, tj. po odtížení vzorku dochází k postupnému vymizení přetvoření způsobeného dotvarováním kompozitu [14]. Pro kompozitní materiály s vysokým podílem vláken je velikost

přetvoření od dotvarování v této fázi nízká [6].

Druhá fáze dotvarování je charakterizována pozvolným (velmi mírným) nárůstem přetvoření po dlouhou dobu. Zde již chování dominantně ovlivňují nosná vlákna. V této oblasti by se správně navržená FRP výztuž měla pohybovat po celou dobu životnosti konstrukce. Dostane-li se dotvarování výztuže do terciální fáze, nastane prudký nárůst deformace, jenž vyústí v nečekané křehké selhání vláken kompozitu. Je proto důležité definovat takové hodnoty dlouhodobě působícího zatížení, tj. stanovit poměr dlouhodobě působícího zatížení k jednorázové únosnosti, aby se po dobu plánované životnosti konstrukce výztuž nedostala do třetí fáze a nedošlo tak k jejímu náhlému porušení.

Z výše uvedeného je zřejmé, že „odolnost/životnost“ FRP výztuže roste, pokud klesá poměr mezi dlouhodobě aplikovaným zatížením a jednorázovou odolností. Přímý dopad má kompozice FRP výztuže, především typ a objemový podíl vláken a též způsob (směr) zatížení. S vyšším podílem vláken je výztuž méně náchylná k dotvarování, uhlíková vlákna jsou vůči dotvarování a okolnímu agresivnímu prostředí téměř netečná.

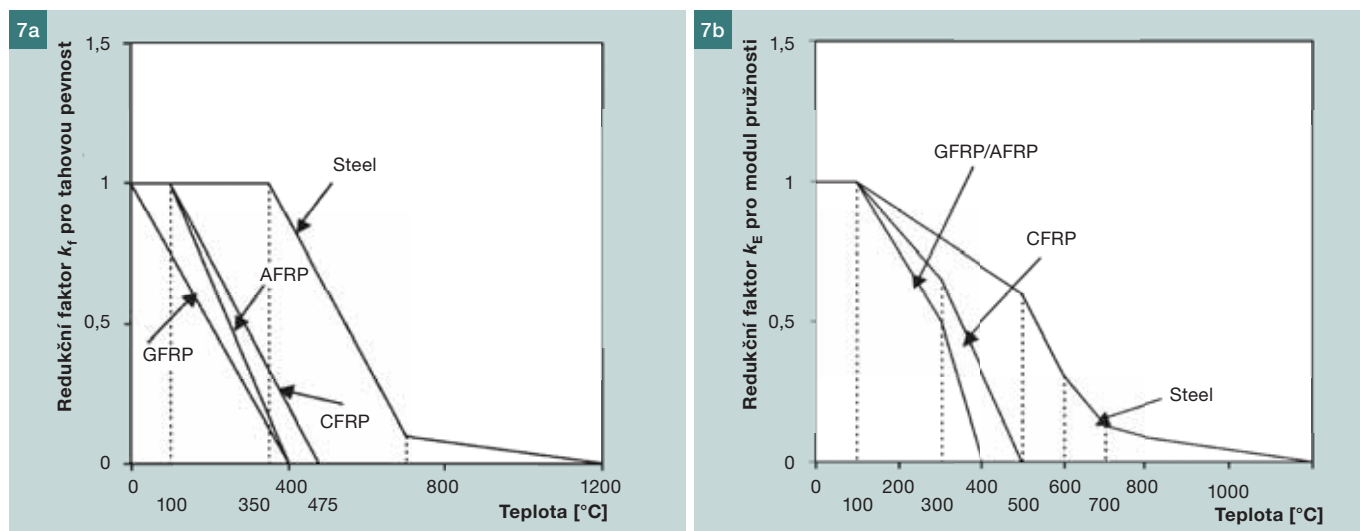
Publikované články i vlastní provedené experimenty vedou k závěru, že existuje lineární závislost mezi pevností při přetržení vlivem dotvarování (dlouhodobá tahová pevnost) a logaritmem času a to pro všechny úrovně aplikovaného zatížení (příklad je na obr. 6).

Neoddělitelný vliv na výsledné hodnoty dlouhodobé tahové pevnosti pro požadovanou životnost konstrukce má

míra agresivity okolního prostředí, tj. v jakém prostředí se zatížená FRP výztuž nachází. Dominantní z tohoto hlediska je především vliv alkality okolního prostředí, teplota, zmrazovací cykly a též vlhkost [14], [15], [16].

Stručně shrnutí redukčních součinitelů pro stanovení dlouhodobé tahové pevnosti dle různých používaných směrnic je uvedeno v tab. 2. Omezení jsou často velmi přísná a pro spoustu kompozitních výztuží značně devalvující (především [7]). Jednotlivé přístupy (modely) navíc vykazují velký rozptyl získaných hodnot, přičemž některé nemají přímou návaznost na skutečné chování výztuže. Značný konzervatismus návrhových přístupů spočívá především ve skutečnosti, že definované limity nejsou podloženy dostatečným počtem dlouhodobých experimentálních měření. Modul pružnosti (oproti tahové pevnosti) není v dlouhodobém měřítku působícím zatížením podstatně ovlivněn.

Postup dle [5] je ve srovnání s ostatními komplexnější a je v souladu s přístupem norem EN. Umožňuje zohlednit proměnnost okolního prostředí, a tím i zohlednit jeho vliv na dlouhodobou únosnost FRP výztuže, čímž se návrh stává přesnějším. Vyžaduje znalost závislosti mezní tahové pevnosti výztuže na logaritmu času (příklad na obr. 6), což opět napomáhá ztotožnit obdržené výsledky s konkrétní navrhovanou FRP výztuží. Problematika stanovení dlouhodobé únosnosti je však velmi široká a z důvodu rozsahu předkládaného článku zde nebude hlouběji diskutována. Popis návrhu ohýbaného prvku s FRP výztuží i s ohledem na dlouhodobou spolehlivost bude uveden v tematicky navazujícím článku.



Chování FRP výztuže při působení zvýšených teplot

FRP výztuž v případě vystavení zvýšeným teplotám mění své vlastnosti. Změna mechanických vlastností FRP výztuže závisí především na složení a vlastnostech matrice, méně pak na vlastnostech výztužných vláken. Velmi důležitý je především charakter teplotního zatížení, který na FRP výztuž působí. Fyzikální i mechanické vlastnosti kompozitu se zásadně mění, pokud posuzovaná výztuž dosáhne teploty skelného přechodu matrice T_g (tab. 1). V případě vystavení kompozitu teplotám nižším než T_g je celistvost kompozitu zajištěna, dochází však k urychlení chemických a fyzikálních reakcí, které ve výztuži probíhají (stárnutí, dotvarování apod.). Při dlouhodobé expozici tomuto prostředí je třeba tuto skutečnost uvážit již při návrhu konstrukce. V případě krátkodobého zatížení touto teplotou nedochází k změně tahových vlastností výztuže.

Při překročení teploty T_g kompozit postupně ztrácí svou tuhost, matrice přestává přenášet smyková napětí a dochází k snížení tahové pevnosti, modulu pružnosti a především k velmi výrazné degradaci kontaktu mezi výztuží a okolním betonem (tj. k ztrátě soudržnosti). Celkový kolaps výztuže nastává v případě, že teplota výztuže dosáhne teploty degradace (tavení) výztužných vláken.

Z uvedeného je zřejmé, že je třeba rozlišovat, zda se jedná o běžný provozní stav (např. části konstrukce trvale vystavené provoznímu teplotnímu zatížení) či o zatížení mimořádné (např. požárem).

V případě běžné provozní situace je v [7] doporučeno využít kompozitní výztuž s T_g vyšší minimálně o 30 °C oproti nejvyšším očekávaným teplotám kon-

strukce. Při návrhu je pak třeba uvážit vliv vyšší provozní teploty na životnost.

Odlíšná je situace v případě mimořádného zatížení – požáru. Zde je nutno rozlišit chování samotné (nechráněné) výztuže při působení teplot vyšších než T_g a chování celého betonového průřezu vyztuženého touto výztuží. V odborné literatuře [17] lze nalézt výsledky experimentů prováděných na nechráněných FRP výztužích (obr. 7). Vzhledem k dosavadním zkušenostem a nově získaným poznatkům je však nutno konstatovat, že betonové prvky vyztužené kompozitní výztuží se při požáru chovají lépe, než jak by bylo očekáváno pouze na základě výsledků uvedených na obr. 7.

Např. [7] uvádí, že betonové prvky vyztužené FRP výztuží nedosahují takové požární odolnosti ve srovnání se shodně navrženými prvky vyztuženými běžnou betonářskou výztuží, avšak

Obr. 7a,b Chování FRP výztuže při vysokých teplotách (zdroj: [17])

■ Fig. 7a,b Behaviour of FRP reinforcement at high temperatures (source: [17])

vhodným konstrukčním uspořádáním je možno zajistit přenášení zatížení i při dosažení teploty v místě výztuže přesahující 500 °C (srovnej s uvedeným na obr. 7). Při těchto teplotách již není možno uvažovat s celistvostí kompozitu, avšak výztužná vlákna jsou stále schopna tahové síly přenášet. Je zřejmé, že přístup k hodnocení požární odolnosti betonových prvků vyztužených FRP výztuží by tak měl být odlišný v porovnání s běžnou betonářskou výztuží. V případě, kdy je zajištěno bezpečné ukotvení výztužných prutů v mís-

Tab. 2 Stanovení dlouhodobé pevnosti dle různých návrhových podkladů ([5] až [10]); kde $f_{fl,k}$ je krátkodobá charakteristická tahová pevnost (5% kvantil), $f_{fl,d}$ krátkodobá návrhová tahová pevnost (0,1% kvantil), η_a , $\eta_{env,t}$ resp. CE redukční součinitelé vlivem prostředí a γ_f materiálový součinitel ■ Tab. 2 Determination of long-term tensile strength according to various design standards ([5] to [10]); where $f_{fl,k}$ denotes the characteristic short-term tensile strength (5% quantile); $f_{fl,d}$ is the design short-term tensile strength (0,1% quantile); η_a , $\eta_{env,t}$ and CE are environmental strength reduction factors; γ_f is partial safety factor for FRP

Norma/směrnice	Prostředí	Redukce dlouhodobé únosnosti		Poznámka
		Typ výztuže		
		GFRP	CFRP	
ACI 440.1R-15	suché	$0,2 C_E f_{fl,d}$; $C_E = 0,8$	$0,55 C_E f_{fl,d}$; $C_E = 1$	jako výchozí uvážená, tzv. zaručená tahová pevnost, tj. cca návrhová hodnota dle EN 1990 (0,1% kvantil)
	vlhké	$0,2 C_E f_{fl,d}$; $C_E = 0,7$	$0,55 C_E f_{fl,d}$; $C_E = 0,9$	
CSA S806-12	–	$0,25 f_{fl,d}$	$0,65 f_{fl,d}$	
fib MC 2010	–	$0,3 f_{fl,k} / \gamma_f$	$0,8 f_{fl,k} / \gamma_f$	$\gamma_f = 1,25$
CNR-DT 203/06	suché	$0,3 \eta_a f_{fl,k}$; $\eta_a = 0,8$	$0,9 \eta_a f_{fl,k}$; $\eta_a = 1$	
	vlhké	$0,3 \eta_a f_{fl,k}$; $\eta_a = 0,7$	$0,9 \eta_a f_{fl,k}$; $\eta_a = 0,9$	
fib Bulletin No.40	–	$f_{fl,k} / (\eta_{env,t} \gamma_f)$; $\eta_{env,t} \approx 1,1 \div 3$; $\gamma_f = 1,25$		přesný postup v [5]
JSCE	–	$= 0,8 \times$ charakteristická hodnota dlouhodobé pevnosti určené ze zkoušek		$\leq 0,7 \times f_{fl,k}$

Literatura:

- [1] ČSN EN 1992-1-1. *Eurokód 2: Navrhování betonových konstrukcí. Část 1-1: Obecná pravidla a pravidla pro pozemní stavby*. Praha: ČNI, 2006.
- [2] SCHWARTZ, M. M. *Composite Materials. Vol. I. a Vol. II.* New Jersey, USA, 1997. ISBN 978-0070-55819-9.
- [3] BANK, L. C. *Composites for Construction: Structural Design with FRP Materials*. New Jersey, USA, 2006. ISBN 978-0471-68126-7.
- [4] GUEDES, R. M. *Creep and fatigue in polymer matrix composites*. 1st edition. UK, 2011. ISBN 978-1-84569-656-6.
- [5] *fib Bulletin No. 40. FRP reinforcement in RC structures*. Lausanne, Switzerland: International federation for structural concrete, 2007. ISBN 978-2-88394-080-2.
- [6] *fib Model Code for Concrete Structures 2010*. Lausanne, Switzerland: International federation for structural concrete, 2013. ISBN 978-3-433-03061-5.
- [7] ACI 440.1R-15. *Guide for the design and construction of concrete reinforced with FRP bars*. Farmington Hills, Michigan, USA: American Concrete Institute (ACI), 2015.
- [8] Recommendation for Design and Construction of Concrete Structures Using Continuous Fiber Reinforcing Materials. *Concrete Engineering Series No. 23*. Japan Society of Civil Engineers (JSCE), 1997.
- [9] CSA S806-12 – *Design and construction of building structures with fibre-reinforced polymers*. Canadian Standards Association (CSA), 2012.
- [10] Technical Document CNR-DT 203/2006: *Guide for the Design and Construction of Concrete Structures Reinforced with Fiber-Reinforced Polymer Bars*. Rome: ITA, 2007. 39 s.
- [11] SKSI: *Manuál na navrhovanie GFRP výstuže do betónových konštrukcií*. Bratislava: Jaga Group, 2015. ISBN 978-80-8076-117-2.
- [12] GIRGLE, F., KOSTIHA, V., MATUŠÍKOVÁ, A., ŠTĚPÁNEK, P. *Metodika stanovení mechanických vlastností FRP výztuží pomocí krátkodobých zkoušek*. Certifikovaná metodika. VUT v Brně, 2016.
- [13] COSENZA, E. Behavior and Modeling of Bond of FRP Rebars to Concrete. *Journal of Composites for Construction*. 1997, Vol. 1, No. 2., pp. 40–51.
- [14] KARBHARI, V. M. (Ed.). *Durability of composites for civil structural applications*. Elsevier, 2007. ISBN 978-0-8493-9109-5.
- [15] GIRGLE, F., BODNÁROVÁ, L., KUČEROVÁ, A., JANÁK, P., PROKEŠ, J. Experimental Verification of Behavior of Glass and Carbon Fibers in Alkali Environment. *Key Engineering Materials*. 2016, Vol. 677, pp 43–48.
- [16] BENMOKRANE, B., ELGABBAS, F., AHMED, E. A., COUSIN, P. Characterization and Comparative Durability Study of Glass/Vinylester, Basalt/Vinylester, and Basalt/Epoxy FRP Bars. *Journal of Composites for Construction*. 2015, Vol. 19, No. 6.
- [17] SAAFI, M. Effect of fire on FRP reinforced concrete members. *Composite Structures*. 2002, Vol. 58, No. 1, pp. 11–20.
- [18] HORÁK, D., ZLÁMAL, M., ŠTĚPÁNEK, P. Experimental Verification of the Behavior of Concrete Members with FRP Reinforcement Exposed to Fire. In: *FRPRCS-11. 11th International Symposium on Fiber Reinforced Polymer for Reinforced Concrete Structures*. Guimaraes: University of Minho, 2013. s. 1–8. ISBN 978-972-8692-84- 1.

tech mimo část konstrukce vystavenou požáru (tj. v oblasti, kde není dosaženo kritické teploty T_g), jsou pruty schopny přenášet tahové síly i při teplotách vysoce přesahující T_g . Tyto závěry podporují i vlastní provedené experimenty (např. [18]).

Norma [9] již tuto skutečnost reflektuje a vychází z předpokladu, že z hlediska poklesu únosnosti výztužných FRP prutů je kritická teplota cca 325 °C, kdy je dosaženo redukce únosnosti o cca 50 % (tato skutečnost platí pro skleněná vlákna). Pro tento předpoklad uvádí v rámci přílohy grafy závislosti teploty, krytí a času vystavení normovému požáru, které je možné využít při návrhu konstrukce s FRP výztuží. Je nutno však upozornit, že tyto grafy mají pouze informativní charakter [9].

ZÁVĚR

S ohledem na velké množství komerčně dostupných produktů FRP výztuží různé kvality je nutno, aby navržená FRP výztuž byla v rámci projektu podrobně specifikována, tj. aby byla v projektu uvedena minimálně uvažovaná tahová pevnost (krátkodobá i dlouhodobá) a modul pružnosti; příp. podrobněji definovány i další charakteristiky, s kterými projekt uvažoval. Je zřejmé, a rovněž některé námi provedené experimenty na tuto skutečnost poukazují, že materiálové charakteristiky různých FRP výztuží mohou být značně odlišné.

Na základě získaných zkušeností z vývoje a realizace prvků vyztužených vnitřní FRP výztuží lze konstatovat, že využití tohoto moderního materiálu v reálných aplikačních oblastech se jeví jako opodstatněná a vhodná alternativa k měkké betonářské výztuži a to především v případech, kdy je v daném prostředí využití běžného železobetonového prvku podmíněno vyššími náklady na zajištění jeho trvanlivosti a požadované životnosti. Jedná se především o betonové prvky vystavené působení agresivního prostředí (chloridy, vlhkost, rozmrazovací cykly), u nichž vlivem vzniku a rozvoje trhlin dochází ke korozi výztuže. Významné jsou též aplikační oblasti s výskytem bludných proudů, agresivních podzemních vod apod.

Pro bezpečný návrh těchto prvků je však nutno pochopit odlišnosti FRP materiálu oproti běžným ocelovým vložkám. Ve většině případů nelze aplikovat zabitě postupy pro návrh železobetonu. Jsou však již dostupné směrnice a normy, které lze pro bezpečný návrh konstrukce vyztužené FRP výztuží využít (např. [5], [7], [9], příp. [11]), což dokazují především úspěšné realizace staveb s využitím tohoto moderního materiálu.

Návrhem konstrukcí vyztužených FRP výztuží se bude věnovat navazující článek v příštím čísle.

Prezentované výsledky byly získány za finanční podpory projektu Technologické agentury ČR TA04010881 „Stanovení dlouhodobé spolehlivosti kompozitních výztuží s ohledem na zvýšení jejich užitných vlastností“ a interních projektů FAST-S-15-2899 „Využití progresivních FRP materiálů v odolných konstrukcích“ a FAST-J-17-4555 „Únava vnitřních kompozitních výztuží při vysokocyklickém namáhání a jejich soudržnost s betonem“.

Ing. František Girgle, Ph.D.
Fakulta stavební VUT v Brně
e-mail: girgle.f@fce.vutbr.cz



Ing. Jan Prokeš, Ph.D.
Prefa Kompozity, a. s.
e-mail: prokes@prefa.cz



Ing. Ondřej Januš
Fakulta stavební VUT v Brně
e-mail: janus.o@fce.vutbr.cz



Ing. Vojtěch Kostiha
Fakulta stavební VUT v Brně
e-mail: kostiha.v@fce.vutbr.cz



prof. RNDr. Ing. Petr
Štěpánek, CSc.
Fakulta stavební VUT v Brně
e-mail: stepanek.p@fce.vutbr.cz



Text příspěvku byl posouzen odborným lektorem.
The text was reviewed.