

VLIV POVRCHOVÉ ÚPRAVY A ZKUŠEBNÍ KONFIGURACE NA SOUDRŽNOST VNITŘNÍ GFRP VÝZTUŽE ■ EFFECT OF SURFACE TREATMENT AND TEST CONFIGURATION ON BOND BEHAVIOUR OF GFRP REBARS

Ondřej Januš, František Girgle,
Vojtěch Kostiha, Petr Štěpánek,
Pavel Šulák, Mohamad Mansour

Článek volně navazuje na příspěvky z oblasti návrhu kompozitních materiálů, které byly uveřejněny v časopise Beton TKS v loňském roce v čísle 2 [18] a 3 [19]. Zabývá se problematikou zajištění spolehlivého spolupůsobení kompozitní výztuže na bázi skleněných vláken s okolním betonem, které je zcela klíčové pro bezpečný a trvanlivý návrh konstrukce. Pokouší se též upozornit na přímý vliv zvolené konfigurace testu na získané mechanické charakteristiky kontaktu a poukazuje na vliv povrchové úpravy výztuže a působícího okolního prostředí (degradace) na způsob a mechaniku porušení kontaktu. Prezentovány jsou dílčí výsledky z probíhajícího výzkumného programu, který se danou problematikou zabývá. ■ The article follows the already presented contributions dealing with the design of composite materials, which were published last year in Beton TKS Journal issues 2 [18] and 3 [19], resp. This article deals with ensuring the reliable interaction of composite glass fibre reinforcement with surrounding concrete. This interaction is crucial for the safe and durable design of structures. It also attempts to draw attention to direct influence of the chosen test configuration on the mechanical characteristics of the contact. The article points to the influence of the surface treatment of the reinforcement and the surrounding environment on the mechanism of bond failure. Partial results from the ongoing research program are presented.

Jedním ze základních předpokladů návrhu vyztužených betonových konstrukcí je kompatibilita přetvoření mezi betonem a výztuží, která je zajištěna soudržností obou materiálů. Použití kompozitní výztuže (FRP – Fibre Reinforced Polymers) (bez ohledu na její typ a povrchovou úpravu) však vyžaduje modifikaci návrhového přístupu běžně používaného u ocelových žebírkových výztužných vložek, neboť mechanika přenosu sil z výztuže do okolního betonu je odlišná.

Studiem soudržnosti kompozitní výztuže s betonem se zabývalo již mnoho autorů (např. [2], [3], [10] a [13]). Publikované výsledky prokázaly značný vliv fyzikálně-mechanických vlastností výztuže a zejména její povrchové

úpravy. S ohledem na různorodost dostupných produktů na trhu není možné pouze na základě obecného analytického či semiempirického vztahu bez experimentálního ověření spolehlivě určit mechaniku přenosu sil, mezní napětí v soudržnosti a jeho vliv na chování vyztuženého prvku, tj. vliv na deformační chování betonového prvku, a též šířku a vzdálenost trhlin. Je zřejmé, že pro případnou verifikaci dostupných návrhových vztahů je třeba robustní experimentální základna.

Pro zjištění soudržnosti výztuže s betonem se běžně používá několik typů zkoušek:

- pull-out testy (s centricky nebo excentricky uloženým prutem),
- prstencové pull-out testy (ring pull-out test),
- zkoušky soudržnosti při stykovaní výztuže přesahem (splice test),
- nosíkové zkoušky.

Pull-out testy jsou díky své jednoduchosti a schopnosti izolovat jednotlivé parametry s oblibou používány pro stanovení soudržnosti mezi výztuží a betonem. Excentrický pull-out test dovoluje, na rozdíl od standardní konfigurace testu, stanovit vliv krycí vrstvy na soudržnost. Je však zřejmé, že tyto testy nepopisují stav napětí v soudržnosti očekávaný v reálných (ohýbaných) konstrukcích. Mechanismus porušení je při těchto testech odlišný.

Využití nosíkových zkoušek pro stanovení soudržnosti FRP výztuže s betonem, i přestože přesněji vystihují chování výztuže v převážně ohýbaném nosníku, však již není příliš časté a množství relevantních dostupných výsledků je omezené ([8], [9], [11], [15], [16]).

Např. v [15] je možno nalézt srovnání GFRP (Glass Fibre Reinforced Polymer) výztuže s běžnou ocelovou výztuží. Testované kompozitní výztuže vykazovaly nižší mezní napětí v soudržnosti než ocelové pruty. Vliv změny soudržné délky GFRP výztuže s žebírkou na sledované parametry byl sledován v [11]. Při kratší kotevní délce (pětinásobek průměru prutu) docházelo k porušení vytržením výztuže z betonu, kdy bylo patrné oddělení žebírek od jádra prutu. Při zvětšení kotevní délky na ví-

ce než desetinásobek průměru prutu již docházelo k přetržení výztuže. Vliv okrajových podmínek (tj. konfigurace) zkoušky byl řešen v [16]. Testován byl vliv pevnosti betonu, kotevní délky a průměru prutu. Zvýšením pevnosti betonu v tlaku z přibližně 30 MPa na 63 MPa bylo dosaženo vyššího maximálního napětí v soudržnosti. Postupně s uvedeným v [11] vedlo ke změně mechanizmu porušení – z porušení vytržením prutu na porušení roztržením krycí vrstvy. Při porovnání výsledků získaných z různých zkušebních metod byl pozorován v maximálním smykovém napětí jen malý rozdíl.

Výsledky nosíkových zkoušek pro určení vlivu průměru výztuže a tloušťky krycí vrstvy na soudržnost žebírkových GFRP výztuží byly prezentovány v [8]. Snížením tloušťky krycí vrstvy došlo k redukci mezního napětí v soudržnosti a křehčímu chování kontaktu. Ve studii [9] byl testován vliv průměru výztuže, kotevní délky, tloušťky krycí vrstvy i povrchové úpravy GFRP výztuže. Porušení soudržnosti u opískovaných prutů nastalo selháním povrchové vrstvy výztuže. U žebírkových prutů s malou krycí vrstvou docházelo ke kombinovanému způsobu porušení – na horním povrchu výztuže (tj. povrchu orientovaném směrem k tlačným vláknům nosníku) bylo pozorováno odtržení žebírek, na spodním povrchu docházelo ke smykovému porušení betonu mezi žebírkou. Uvedené výzkumy se shodují na závěru, že průměrné maximální napětí v soudržnosti u GFRP výztuže (i v rámci odlišných povrchových úprav) klesá s rostoucím průměrem výztuže. Shodný vliv má i prodloužení kotevní délky.

Důležitým faktorem potenciálně negativně ovlivňujícím dlouhodobou spolehlivost spolupůsobení obou materiálů je alkalické prostředí betonu, které snižuje mechanické charakteristiky GFRP výztuží (např. [7]). Závěry z doposud provedených (ve světové literatuře dostupných) experimentů degradace soudržnosti mezi GFRP výztuží a betonem jednoznačně míru poškození kontaktu vlivem působení alkalického prostředí neurčují. Testované

Tab. 1 Použité GFRP výztuže ■ Tab. 1 Used GFRP reinforcement

Pruty	Druh vlákn	Druh matrice	Povrchová úprava	Poznámka	Degradace
GFRP.E.EPK.14 (osm vzorků)	E – sklo	EP*	opískování + kevlarové vinutí		–
GFRP.E.EPN.14 (tři vzorky)	E – sklo	EP*	opískování + nylonové vinutí	nízká kvalita opískování	–
GFRP.E.VE.L.10 (čtyři vzorky)	E – sklo	VE*	opískování + lněné vinutí		–
GFRP.R.12 (šest vzorků)	E-CR – sklo	VE*	vyfrézovaná žebírka		–
GFRP.E.EPK.10.d180 (čtyři vzorky)	E – sklo	EP*	opískování + kevlarové vinutí	ztráta opískování	180 dní degradace při 60 °C
GFRP.E.VE.L.10.d650 (tři vzorky)	E – sklo	VE*	opískování + lněné vinutí		650 dní degradace při 60 °C
GFRP.AR.VE.L.10.d650 (pět vzorků)	AR – sklo	VE*	opískování + lněné vinutí		650 dní degradace při 60 °C

* EP – epoxid, VE – vinyllester

vzorky však byly často vystaveny de-gradacnímu prostředí jen po krátkou dobu. Ve studii [17] nebyl pozorován úbytek soudržnosti na vzorcích, které byly po zabetonování uloženy po dobu 90 dní v zásaditém roztoku při teplotě 20 °C. Shodný závěr je uveden v [4]. Redukce mezního napětí v soudržnosti na vzorcích, které byly holé uloženy do zásaditého roztoku po dobu 28 dní při teplotě 80 °C a poté zabetonovány, nebyla pozorována. Mechanické vlastnosti výztuží (tahová pevnost) však byly ovlivněny. Je zřejmé, že zásadní vliv na výsledky má konfigurace experimentu.

EXPERIMENTÁLNÍ PROGRAM

Cílem navrženého experimentálního programu, jehož dílčí výsledky jsou v článku prezentovány, bylo především ověřit vliv povrchové úpravy a typu expozice na mezní napětí v soudržnosti. Byla testována soudržnost šesti typů GFRP výztuží s povrchovou úpravou opískováním křemičitým pískem a jednoho typu s vyfrézovanými žebírky. Všechny zkoušky soudržnosti byly provedeny s délkou soudržnosti výztuže s betonem rovnající se pětinasobku

přůměru prutů. V tab. 1 je uveden přehled testovaných vzorků a v tab. 2 jsou vlastnosti použitých výztuží experimentálně stanovené před zkouškou.

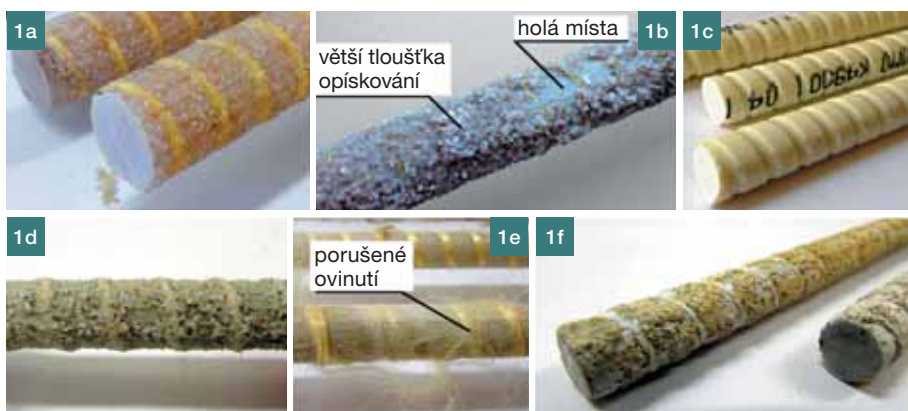
Všechny testované vzorky opískovaných prutů pocházejí od shodného výrobce etablovaného v ČR. Výztuž s povrchovou úpravou žebírky byla dodána od výrobce s celoevropskou působností. Povrchová úprava vzorků GFRP.E.EPN.14 výztuží je provedena v nízké kvalitě. Na povrchu prutů se nacházejí holá místa nebo naopak místa s větší tloušťkou opískování (obr. 1b). U typů GFRP.E.EPK.14 a GFRP.E.EPN.14 ovinutí nevytváří výstupky na

povrchu prutu. Vzorky GFRP.E.VE.L.10 jsou opatřeny lněným ovinem, který vytváří malé výstupky na povrchu vzorků. Žebírka u vzorků GFRP.R.12 jsou vytvořena vyfrézováním drážky hloubky 0,7 mm.

Pro určení vlivu zásaditého prostředí na degradaci povrchové vrstvy opískovaných prutů byly vzorky GFRP.E.EPK.10.d180, GFRP.E.VE.L.10.d650 a GFRP.AR.VE.L.10.d650 uloženy po definovaný čas v alkalickém roztoku, který byl připraven dle CSA S806-12 [5] ve složení 118,5 g Ca(OH)₂, 0,9 g NaOH a 4,2 g KOH v 1 l deionizované vody. Roztok dle [5] simuluje prostředí betonu. Pro zvýšení rychlosti degradace byl roztok temperován na 60 °C. Hodnoty pH se u všech sledovaných uložení vzorků pohybovaly v intervalu 12,66 až 12,97. Podrobněji o experimentálním programu degradace GFRP výztuží alkalickým prostředím v [7].

Vzorky GFRP.E.EPK.10.d180 byly vyjmuty z lázně po 180 dnech. Již po tomto časovém intervalu došlo téměř k celoplošné ztrátě adhezivní vrstvy. Kevlarový ovin byl navíc na několika místech porušen (obr. 1e).

Vzorky GFRP.E.VE.L.10.d650 a GFRP.AR.VE.L.10.d650 byly vystaveny de-gradacnímu prostředí po dobu 650 dní. Během této doby nedošlo k významnému (viditelnému) narušení soudrž-

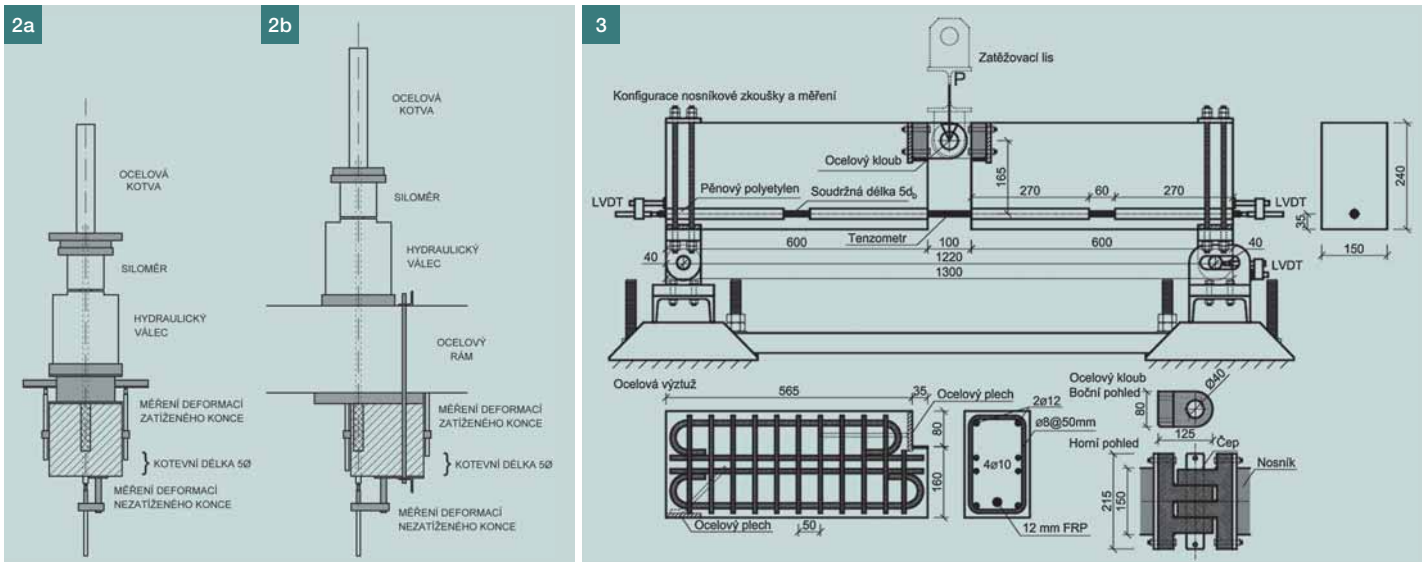


Tab. 2 Mechanické vlastnosti testovaných výztuží ■ Tab. 2 Mechanical properties of the reinforcement used

Pruty	Deklarovaný průměr prutu [mm]	Průměr vč. povrchové úpravy [mm]	Střední tahová pevnost [MPa] ± směrodatná odchylka	Střední modul pružnosti [GPa] ± směrodatná odchylka	Mezní přetvoření [%]
GFRP.E.EPK.14	14	15,23	980 ± 9,6	52,1 ± 1,6	1,88
GFRP.E.EPN.14	14	15,02	654 ± 14,6	46,1 ± 0,8	1,41
GFRP.E.VE.L.10	10	10,87	818 ± 8,6	48,9 ± 2,2	1,67
GFRP.R.12	12	13,43	1445 ± 72,1	59,9 ± 0,4	2,41
GFRP.E.EPK.10.d180	10	10,40	795 ± 51,8	46,0 ± 0,8	1,73
GFRP.E.VE.L.10.d650	10	10,78	590 ± 42,8	50,3 ± 1,1	1,17
GFRP.AR.VE.L.10.d650	10	11,08	453 ± 19,4	42,9 ± 1,1	1,06
Ocel.14	14	–	*574 ± 3,5	199,1 ± 7,7	–

* mez kluzu ocelové výztuže

Obr. 1 Testované vzorky: a) GFRP.E.EPK.14, b) GFRP.E.EPN.14, c) GFRP.R.12, d) GFRP.E.VE.L.10, e) GFRP.E.EPK.10.d180, f) GFRP.E.VE.L.10.d650 a GFRP.AR.VE.L.10.d650 ■ Fig. 1 Tested samples: a) GFRP.E.EPK.14, b) GFRP.E.EPN.14, c) GFRP.R.12, d) GFRP.E.VE.L.10, e) GFRP.E.EPK.10.d180, f) GFRP.E.VE.L.10.d650 and GFRP.AR.VE.L.10.d650



nosti povrchové vrstvy křemičitého písku s výztuží. I po očištění byla stále zřetelně patrná vysrážená vrstva především hydroxidu a uhličitanu vápenatého (obr. 1f).

Z tab. 3 je patrné, že pro zkoušky soudržnosti bylo doposud testováno celkem 37 vzorků. Pro stanovení vlivu jednotlivých povrchových úprav bylo navrženo 31 centrických pull-out testů. Každý druh povrchové úpravy byl testován v sadě tří až pěti vzorků. Vliv tloušťky krycí vrstvy betonu byl ověřen na vzorcích GFRP.E.EP.K.14 s využitím excentrického pull-out testu (čtyři vzorky). Pro ověření soudržnosti výztuže v reálných podmínkách převážně ohýbaných konstrukcí byla navržena nosníková zkouška, pomocí které byla doposud určena soudržnost dvou vzorků první sady, přičemž testy dále pokračují.

Centrická a excentrická pull-out zkouška

Centrické pull-out testy byly provedeny dle ACI 440.3R-12 [1]. Pruty byly zabetonovány v krychli o hraně 200 mm z betonu o střední tlakové pevnos-

ti 55 MPa. Délka, na niž je zajištěna soudržnost, byla uvážena jako pětina-sobek profilu prutu, zbývající část byla separována. Betonáž vzorků probíhala ve svislé poloze, přičemž bylo dbáno na dobré zhutnění. V případě excentrických pull-out testů bylo krytí výztuže rovno průměru prutu (vzorek neobsahoval žádnou příčnou výztuž), sledovaná kotevní délka byla shodná s centrickými pull-out testy. Uspořádání zkoušky eliminovalo nežádoucí pootáčení vzorku (obr. 2). Relativní posun výztuže byl měřen indukčnostními snímači. Dva snímače zaznamenávaly posun zatíženého konce a jeden pak posun nezatíženého konce.

Upravená nosníková zkouška

Upravená nosníková zkouška vychází z konfigurace nosníkové zkoušky soudržnosti ocelové výztuže dle RILEM FIP-CEB [12], přičemž byla zachována většina doporučených rozměrů. Byly však provedeny úpravy s ohledem na specifika GFRP výztuží a také pro umožnění případného cyklického zatěžování ve shodné konfiguraci tes-

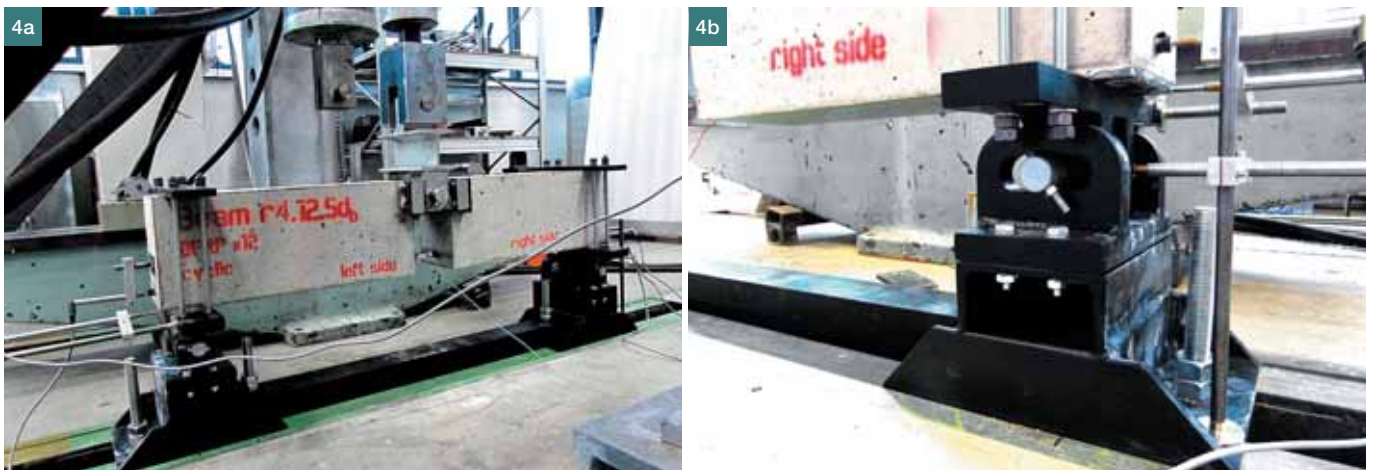
Obr. 2 Zkušební konfigurace: a) centrický pull-out test, b) excentrický pull-out test

Obr. 3 Geometrie nosníkové zkoušky

Obr. 4 Nosníková zkouška: a) uspořádání, b) posuvná podpora

tu. Soudržná délka prutu byla z důvodu nižšího modulu pružnosti testovaných GFRP výztuží zmenšena z desetinásobku průměru výztuže na pětina-sobek. Při této kotevní délce je možné uvažovat u GFRP výztuže rovnoměrné rozdělení napětí (např. [3]). Dále je upraven ocelový kloub – je pevně kotven k jednotlivým segmentům nosníku, přičemž zatížení je vnášeno přímo na čep kloubu. Střední tlaková pevnost betonu použitého při nosníkových zkouškách byla 64 MPa.

V průběhu zkoušky byl indukčnostními snímači zaznamenáván vodorovný posun podpory a pokluz nezatížených konců v oblasti soudržnosti



Tab. 3 Experimentální výsledky | Tab. 3 Summary of the experimental results

Test	Označení	Napětí v soudržnosti τ_{max} [MPa]		Pokluz nezatiženého konce S_f [mm]		Pokluz zatíženého konce S_l [mm]		Mechanismus porušení
Centrický pull-out	GFRP.E.EPK.14	18,98	19,74 ± 2,10	0,143	0,176 ± 0,023	1,406	1,496 ± 0,129	P*
		22,22		0,197		1,653		
		17,30		0,182		1,377		
		20,47		0,181		1,546		
	GFRP.E.EPN.14	15,76	16,80 ± 1,03	0,336	0,251 ± 0,084	2,107	2,148 ± 0,037	P*
		16,83		0,248		2,176		
		17,82		0,169		2,162		
	GFRP.E.EPK.10.d180	14,14	11,72 ± 2,75	2,114	2,424 ± 0,266	3,147	3,391 ± 0,249	P*
		8,39		2,465		3,210		
		13,81		2,462		3,644		
		10,53		2,657		3,563		
	GFRP.E.VE.L.10	18,93	19,40 ± 1,50	0,328	0,352 ± 0,118	1,436	1,572 ± 0,142	P*
		18,06		0,517		1,619		
		21,56		0,323		1,750		
		19,05		0,238		1,481		
	GFRP.E.VE.L.10.d650	22,78	18,14 ± 4,05	0,092	0,109 ± 0,030	1,434	1,299 ± 0,143	P*
		15,29		0,092		1,149		
		16,36		0,144		1,316		
		10,38		0,144		1,092		
		9,58		0,106		0,995		
	GFRP.AR.VE.L.10.d650	9,68	10,86 ± 1,37	0,101	0,118 ± 0,018	0,957	0,996 ± 0,060	P*
		12,37		0,107		0,936		
		12,27		0,129		1,000		
		19,98		0,415		1,666		
	GFRP.R.12	18,49	19,41 ± 0,65	0,442	0,450 ± 0,083	1,495	1,535 ± 0,087	P*
		18,83		0,375		1,482		
		18,87		0,568		1,499		
		22,24		0,831		1,373		
	Ocel.14	23,16	22,36 ± 1,01	0,884	0,710 ± 0,154	1,228	1,234 ± 0,102	P*
		21,29		0,766		1,197		
23,56		0,534		1,131				
12,82		0,092		0,940				
Excentrický pull-out	GFRP.E.EPK.14	14,57	14,93 ± 2,10	0,129	0,122 ± 0,026	0,657	0,843 ± 0,126	P + S*
		17,84		0,113		0,886		
		14,47		0,154		0,888		
		23,37		0,297		-		
Nosníková zkouška	GFRP.R.12	22,31	22,84	0,316	0,307	-	-	P*

* P – pull-out, S – porušení krycí vrstvy

(obr. 3). Měření posunu v bezprostřední blízkosti zatíženého konce soudržnosti nebylo přímo realizováno. Pro zajištění čtení skutečné působící síly ve výztuži byl uprostřed volné délky výztuže osazen tenzometr. Síla určená z měření tenzometrem byla následně porovnána se silou vypočtenou ze silové rovnováhy.

VÝSLEDKY A DISKUZE

Získané výsledky jsou přehledně sumarizovány v tab. 3. Maximální napětí v soudržnosti τ_{max} bylo stanoveno s uvážením konstantního rozdělení napětí po délce se zajištěnou soudržností jako:

$$\tau_{max} = \frac{P_{max}}{\pi d_b l_b}, \tag{1}$$

kde P_{max} je maximální síla v GFRP prutu, d_b průměr výztuže a l_b soudržná délka.

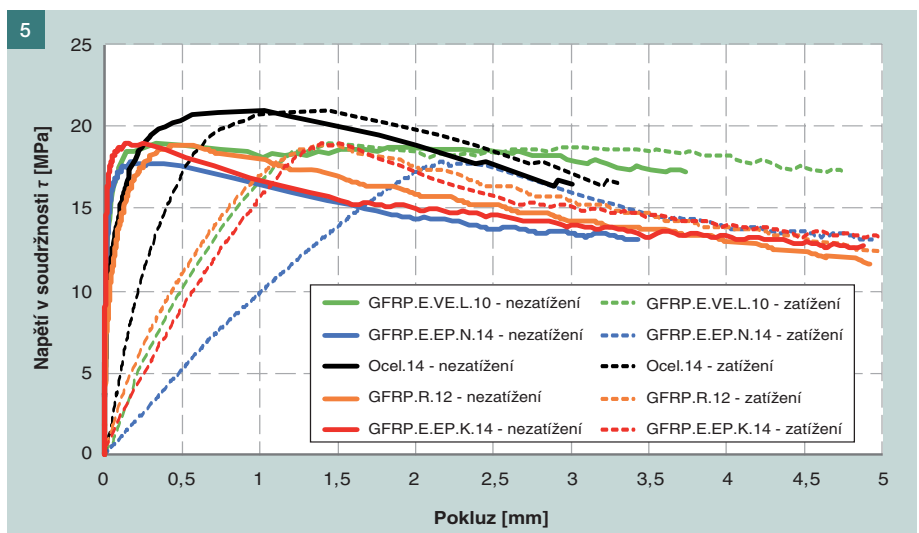
Vliv povrchové úpravy

Pro zjištění vlivu povrchové úpravy výztuže na soudržnost byly realizovány centrické pull-out testy. Získané výsledky jsou patrné z tab. 3. Pokluz zatíže-

ného a nezatíženého konce testovaného vzorku výztuže v závislosti na působícím napětí v soudržnosti je pro jednotlivé testované sady uveden v grafu na obr. 5. Po provedení zkoušek byly vzorky z důvodu analýzy způsobu jejich porušení rozřezány.

Typické porušení kontaktu opískovaných prutů je patrné z obr. 7. Tenká povrchová vrstva výztuže je v celém rozsahu oddělena od jádra. Výjimečně došlo k porušení soudržnosti kombinací smykového porušení betonu a oddělení opískování od jádra průřezu. U prutů s žebírky docházelo ke smykovému porušení betonu u úrovni žebírek (způsob porušení obdobný ocelovým výztužím). Obecně uváděný předpoklad (např. *fib* Bulletin No. 40 [6]), že soudržnost u této povrchové úpravy roste jen do pevnosti betonu cca 30 MPa, tak nebyl (s ohledem na střední pevnost betonu vzorků a způsob porušení) potvrzen.

Maximální dosažené napětí v soudržnosti je téměř shodné u všech typů testovaných povrchových úprav bez vlivu degradace a dosahuje hodnoty přibližně 20 MPa. Je však třeba zdůraznit, že výsledky nejsou získány na prutech shodných průměrů (tab. 1 a 2). Se snižováním průměru výztuže obecně dochází ke zvyšování maximálního napětí v soudržnosti, např. [2]. U vzorků GFRP.R.12 je maximálního napětí v soudržnosti dosaženo při vyšším pokluzu nezatíženého konce výztuže než v případě opískovaných prutů. Rozdíl mezi pokluzem zatíženého a nezatíženého konce výztuže je způsoben jejím přetvořením na soudržné délce a je tak závislý především na modulu pružnosti. Pro srovnání je do grafu vyneseno také chování ocelové výztuže průměru 14 mm s modulem pruž-





nosti přibližně čtyřikrát vyšším, než je modul pružnosti testovaných GFRP výztuží.

V průběhu experimentu byl potvrzen závěr studie [2]. Dochází-li k porušení soudržnosti na styku jádra a povrchové úpravy a okolní beton zůstává neporušen (v této studii se takto porušují všechny pruty s povrchovou úpravou opískováním), není vhodné popisovat sestupnou větev na základě průběhu závislosti pokluzu nezatiženého konce na napětí v soudržnosti. Při pokluzu výztuže se do oblasti soudržnosti postupně dostává část výztuže s neporušenou povrchovou úpravou a tím zvyšuje (nadhodnocuje) zbytkovou soudržnost.

Vliv konfigurace zkoušky

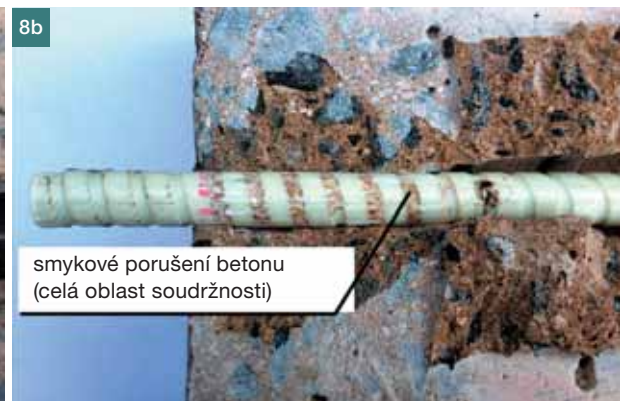
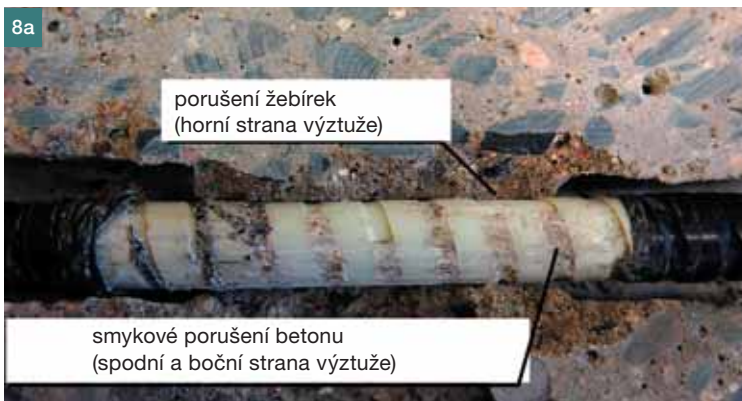
Centrický/excentrický pull-out test

Vliv betonové krycí vrstvy byl sledován u vzorků GFRP.E.P.K.14. K porušení soudržnosti u vzorků při centrickém pull-out testu docházelo, v souladu s očekáváním, oddělením tenké povrchové vrstvy od jádra výztuže (obr. 7). Trhliny v betonu v oblasti se zajištěnou soudržností nebyly pozorovány. V případě excentrického pull-out testu při zatěžování vznikala v místě se zajištěnou soudržností podélná trhлина (obr. 6). Porušení vzorku obvykle nastalo vytažením při plošném porušení krycí vrstvy. V případě prutů umístěných v blízkosti okraje docházelo nejen ke snížení maximál-

ního napětí v soudržnosti (v porovnání s centricky umístěným prutem), ale také bylo maximálního napětí v soudržnosti dosaženo při menším pokluzu výztuže (tab. 3).

Centrický pull-out test/nosníková zkouška

Na vzorcích GFRP.R.12 byl sledován vliv konfigurace testu (působících tlakových napětí v kotevní oblasti) na mezní napětí v soudržnosti. K tomuto účelu byly provedeny centrické pull-out testy a upravená nosníková zkouška. Při centrickém uložení výztuže v betonové krychli (pull-out test) je dosaženo dostatečného ovinutí betonem a předpokládá se dosažení nejvyšší hodnoty napětí v sou-



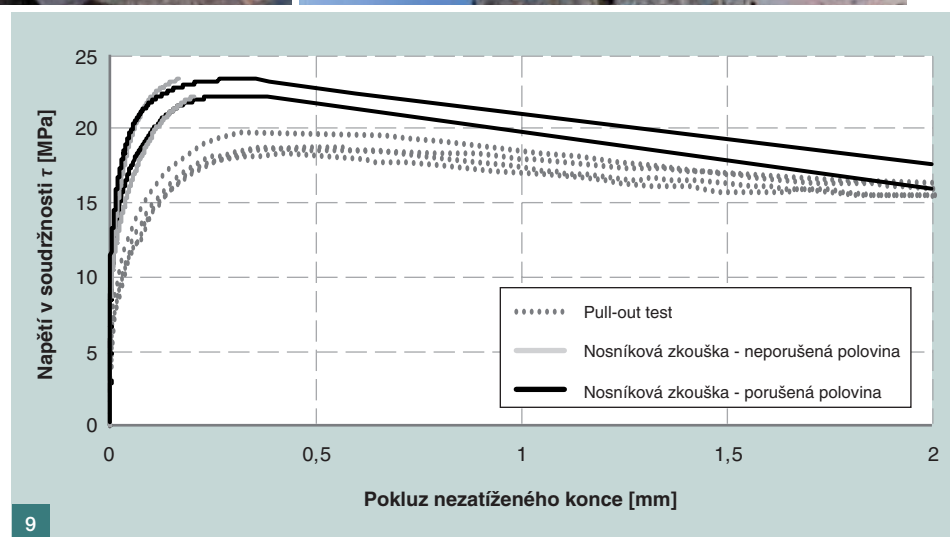
Obr. 5 Závislost pokluzu zatíženého a nezatiženého konce na napětí v soudržnosti (centrický pull-out) | Fig. 5 Stress-slip diagrams from the centric pull-out tests

Obr. 6 Porušení krycí vrstvy prutů GFRP.E.P.K.14 | Fig. 6 Concrete cover splitting GFRP.E.P.K.14

Obr. 7 Porušení soudržnosti prutů GFRP.E.P.K.14 | Fig. 7 Separation of the sand-coating GFRP.E.P.K.14

Obr. 8 Porušení soudržnosti: a) nosníková zkouška, b) pull-out test | Fig. 8 Bond failure: a) beam test, b) pull-out test

Obr. 9 Porovnání pull-out testu a nosníkové zkoušky | Fig. 9 Comparing the pull-out test to the beam test



držnosti. Jak bylo uvedeno v předchozím textu, při centrickém pull-out testu došlo u zkoumaných vzorků GFRP.R.12 k porušení vytažením výztuže, kdy limitující byla smyková únosnost betonu v úrovni výšky žebírek výztuže. Na povrchu vzorku se nacházelo pouze několik odřenin od ostrých hran kameniva (obr. 8b). Nežádoucí roztržení betonové krychle nenastalo u žádného ze zkoušených vzorků.

V případě nosníkové zkoušky bylo porušení krycí vrstvy bráněno hustě rozmístěnou příčnou výztuží. Také při této konfiguraci zkoušky nedošlo u žádného ze vzorků k roztržení betonu a porušení bylo způsobeno vytažením výztuže. Nebyl též pozorován vznik trhlin na povrchu betonu. Po rozřezání vzorku byl však pozorován mírně odlišný mechanismus porušení. V blízkosti líce betonového prvku docházelo (shodně s pull-out testy) ke smykovému porušení betonu, ovšem na horní straně výztuže orientované dále od krycí vrstvy došlo k oddělení několika žebírek (obr. 8a). Při deformaci nosníku během zatěžování je horní strana výztuže tlačena proti betonu, což zřejmě vedlo k popsanému porušení. Stanovené mezní napětí v soudržnosti bylo oproti očekávání mírně vyšší než v případě pull-out testu. Nárůst činil cca 17 % při poklesu pokluzu nezatiženého konce o 32 % (obr. 9). Tyto údaje jsou však získány z malého počtu vzorků a je třeba je dále zpřesnit/doplnit. Popisované je zřejmě způsobeno změnou mechanismu porušení, v menší míře pak vyšší tlakovou pevností betonu.

Vliv degradace alkalickým prostředím

V grafu na obr. 10a je provedeno srovnání chování degradovaných vzorků

GFRP.E.EP.K.10.d180 a referenčních vzorků GFRP.E.EP.K.14 s epoxidovou matricí. Patrný je rozdílný přenos sil mezi výztuží a betonem. Kontakt vzorků GFRP.E.EP.K.10.d180, u kterých došlo k plošné ztrátě vrstvy křemičitého písku (obr. 1e), přenáší po porušení adheze působící síly pouze třením. Při oprávněném předpokladu, že vzorky menších průměrů dosahují vyšších napětí v soudržnosti [2], lze konstatovat, že dochází k redukci únosnosti o více než 40 %. S ohledem na získané výsledky bude výztuž dále podrobena analýze, a to především s ohledem na určení teploty skelného přechodu, neboť nízká hodnota T_g by mohla indikovat náchylnost na působení vyšších teplot, jež jsou využívány k urychlení degračních zkoušek. Uvedené bylo patrné i ze zkoušek dané výztuže v tahu, kdy střední tahová pevnost vzorků temperovaných v alkalické lázni na 60 °C klesla o cca 26,5 % oproti pevnosti vzorků referenčních. Výsledky testů GFRP výztuží při vystavení degračnímu (alkalickému) prostředí, v rámci kterých byl tento poznatek získán, budou čtenářům představeny v některém z dalších připravovaných článků.

Druhým testovaným typem GFRP výztuže byly vzorky s vinylesterovou matricí a lněným vinutím, které byly vystaveny shodnému degračnímu prostředí po dobu 650 dní (obr. 10b). Vliv alkality prostředí byl určován na dvou typech výztuží se stejnou povrchovou úpravou a matricí, avšak s jiným druhem použitých vláken. I když vizuální kontrola vzorků po vyjmutí z lázně neindikovala rozdílnou degradaci, došlo k rozdílné míře ovlivnění. Snížení únosnosti kontaktu GFRP.E.VE.L.10.d650 s E vlákny bylo nižší než 10 %. U vzorků GFRP.AR.VE.L.10.d650 s AR vlákny však došlo k redukci mezního napětí v soudrž-

nosti větší než 40 %. V případě těchto vzorků došlo k jinému typu porušení – nenastalo pouze oddělení povrchové vrstvy od jádra průřezu, ale docházelo k poškození již v průřezu výztuže. Společně s povrchovou úpravou byla oddělena i některá krajní vlákna. Pozorovaný mechanismus porušení je neobvyklý a jednoznačný závěr by měl být podložen podrobnějším zkoumáním.

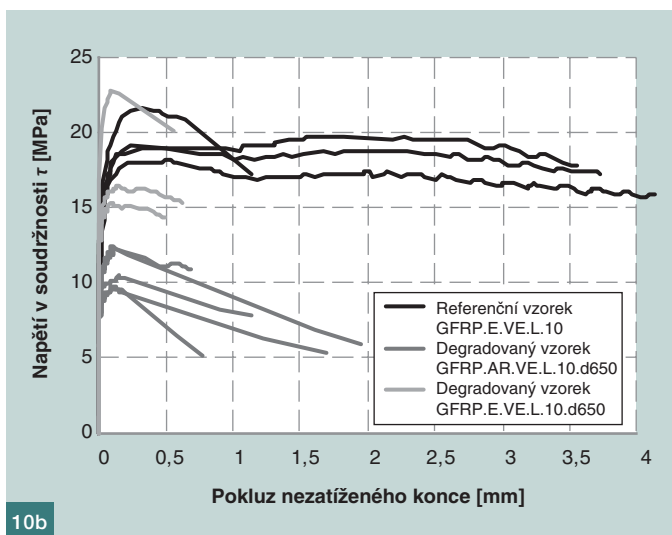
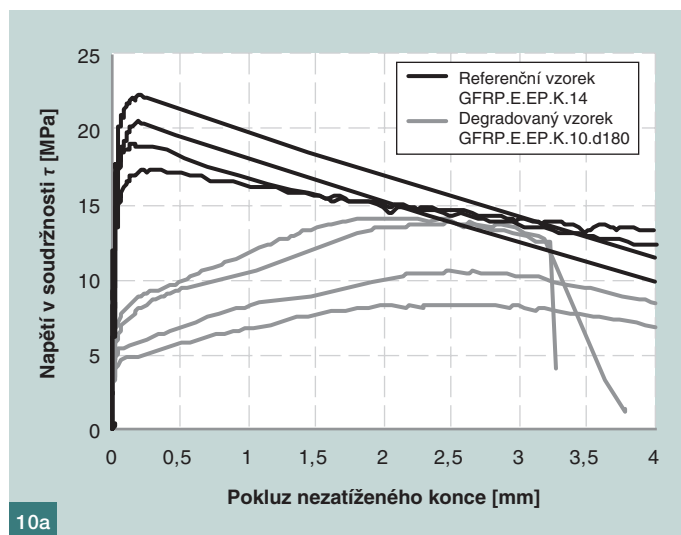
ZÁVĚR

V článku jsou prezentovány dílčí výstupy z probíhajícího rozsáhlého experimentálního programu, který se zabývá problematikou soudržnosti GFRP výztuží s betonem, a to především s ohledem na vliv povrchové úpravy prutů a zkušební konfigurace na mezní napětí v soudržnosti. Zkoumán je také vliv degradace alkalickým prostředím betonu. Z doposud získaných výsledků lze vyslovit následující závěry:

- opískované i žebírkové GFRP pruty vykazují srovnatelné maximální napětí v soudržnosti při centrickém pull-out testu (přibližně 20 MPa). Žebírkové pruty však dosahují maximálního napětí při větším pokluzu výztuže. Hodnota maximálního napětí v soudržnosti je v porovnání s běžnou ocelovou žebírkovou výztuží mírně nižší,
- tloušťka krycí vrstvy má značný vliv na chování výztuže v soudržnosti. U minimální krycí vrstvy dochází k významnému snížení maximálního napětí v soudržnosti a odpovídajícího pokluzu,

Obr. 10 Závislost pokluzu nezatiženého konce na napětí v soudržnosti opískovaných prutů s: a) epoxidovou matricí, b) vinylesterovou matricí ■

Fig. 10 Stress-slip diagrams for the sand-coated bars with: a) epoxy resin, b) vinyl ester resin



Literatura:

- [1] 440.3R-12. *Guide test methods for fiber-reinforced polymers (FRPs) for reinforcing or strengthening concrete structures*. Farmington Hills, Michigan: ACI, 2012.
- [2] ACHILLIDES, Z., PILAKOUTAS, K. Bond Behavior of Fiber Reinforced Polymer Bars under Direct Pullout Conditions. *Journal of Composites for Construction*. 2004, Vol. 8, No. 2, p. 173–181.
- [3] AIELLO, M., LEONE, M., PECCE, M. Bond Performances of FRP Rebars-Reinforced Concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering*. 2007, Vol. 19, p. 205–213.
- [4] BAKIS, C. E., FREIMANIS, A. J., GREMEL, D., NANNI, A. Effect of Resin Material on Bond and Tensile Properties of Unconditioned and Conditioned FRP Reinforcement Rods. In: *First international conference on durability of fiber reinforced polymer (FRP) composites for construction*. 1998, p. 525–535.
- [5] CSA S806-12. *Design and construction of building structures with fibre-reinforced polymers*. Canadian Standards Association (CSA), 2012.
- [6] *fib Bulletin No. 40. FRP reinforcement in RC structures*. Technical report. Lausanne, Switzerland: International Federation for Structural Concrete (fib), 2007.
- [7] GIRGLE, F., BODNÁROVÁ, L., JANUŠ, O., KOSTIHA, V. Influence of Alkalinity and Ambient Temperature on Long-Term Properties of GFRP Reinforcement. *Key Engineering Materials*. 2018, Vol. 760, p. 213–218.
- [8] KOTYNIA, R., SZCZECH, D., KASZUBSKA, M. Bond Behavior of GFRP Bars to Concrete in Beam Test. *Key Engineering Material*. 2017, Vol. 193, p. 401–408.
- [9] MAZAHERIPOUR, H., BARROS, J. A. O., SENA-CRUZ, J. M., PEPE, M., MARTINELLI, E. Experimental study on bond performance of GFRP bars in selfcompacting steel fiber reinforced concrete. *Composite Structure*. 2013, Vol. 95, p. 202–212.
- [10] NANNI, A., AL-ZAHARANI, M., AL-DULAJEN, S., BOOTHBY, T. Bond of FRP reinforcement to concrete – Experimental results. *Non-Metallic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures*. 1995, p. 137–145.
- [11] PECCE, M., MANFREDI, G., REALFONZO, R., COSENZA, E. Experimental and analytical evaluation of bond properties of GFRP bars. *Journal of Materials in Civil Engineering*. 2001, Vol. 13, No. 4, p. 282–290.
- [12] RILEM, FIP-CEB. Tentative recommendations, recommendations for reinforcing steel, bond test for reinforcing steel: 1–Beam test (7-ii-28 d) 2–Pull-out test (7-ii-128). *Materials and Structures*. 1973, Vol. 6, No. 2, p. 79–118.
- [13] SÓLYOM, S., BALÁZS, G. L., BOROSNYÓI, A. Bond behaviour of FRP rebars – parameter study. In: *SMAR 2015 – Third Conference on Smart Monitoring, Assessment and Rehabilitation of Structures*. 2015, p. 1–8.
- [14] SÓLYOM, S., BALÁZS, G. L., BOROSNYÓI, A. Material characteristics and bond tests for FRP rebars. *Concrete Structures*. 2015, Vol. 16, p. 38–44.
- [15] TIGHIOUART, B., BENMOKRANE, B., GAO, D. Investigation of bond in concrete member with fibre reinforced polymer (FRP) bars. *Construction and Building Materials*. 1998, Vol. 12, p. 453–462.
- [16] XUE, W., YANG, Y., ZHENG, Q., FANG, Z. Modeling of Bond of Sand-coated Deformed Glass Fibre-reinforced Polymer Rebars in Concrete. *Polymers & Polymer Composites*. 2016, Vol. 24, No. 1, p. 45–56.
- [17] ZHOU, J., CHEN, X., CHEN, S. Effect of Different Environments on Bond Strength of Glass Fiber-Reinforced Polymer and Steel Reinforcing Bars. *KSCE Journal of Civil Engineering*. 2012, Vol. 16, No. 6, p. 994–1002.
- [18] GIRGLE, F., PROKEŠ, J., JANUŠ, O., KOSTIHA, V., ŠTĚPÁNEK, P. Kompozitní výztuž do betonu – perspektivní materiál pro odolné a trvanlivé betonové konstrukce. *Beton TKS*. 2017, roč. 17, č. 2, s. 50–55.
- [19] GIRGLE, F., JANUŠ, O., MATUŠÍKOVÁ, A., ŠTĚPÁNEK, P. Navrhování betonových prvků vyztužených kompozitní výztuží – návrh na ohyb. *Beton TKS*. 2017, roč. 17, č. 3, s. 54–59.

- mezní napětí v soudržnosti dosažené při nosníkové zkoušce (v případě vzorků GFRP.R.12 s žebírky) je vyšší než při pull-out testu. Tento závěr je však učiněn na základě vyhodnocení malého počtu zkušebních vzorků a bude dále zpřesněn. U vzorků docházelo při pull-out testu ke smykovému porušení betonu v úrovni žebírek. U nosníkové zkoušky byl pozorován mírně odlišný (kombinovaný) způsob porušení. Došlo k porušení betonu smykem se souběžným oddělením některých žebírek od jádra průřezu. Nárůst pevnosti betonu v tlaku by zřejmě znamenal další navýšení únosnosti kontaktu,
- degradace výztuže alkalickým prostředím má u testované výztuže značný vliv na soudržnost. Zásadní z hlediska dlouhodobé odolnosti kontaktu může být teplota skelného přechodu výztuže T_g ([18]). Testy poukazují na skutečnost, že při nízkých hodnotách T_g je výztuž citlivá na působení zvýšené teploty (u vzorků GFRP.E.EP.K.10.d180 temperovaných na 60 °C došlo vlivem celoplošné ztráty adhezivní vrstvy k redukci soudržnosti o více než 40 %),
- experimenty poukázaly na skutečnost, že typ skleněných vláken může

mít vliv na míru snížení mezního napětí v soudržnosti při působení degračního prostředí. Vzorky s E vlákny vykazují redukci nižší než 10 %. Soudržnost vzorků s AR vlákny klesla více než o 40 %. K porušení vzorků s AR vlákny došlo v případě testovaného vzorku odlišně – v průřezu výztuže, kdy se společně s povrchovou úpravou oddělila i krajní vlákna. Tento mechanismus porušení je zřejmě způsoben výrobním postupem a chemickým složením matrice a bude dále podroben analýze.

Závěrem je vhodné poznamenat, že v současnosti je na trhu dostupná celá řada GFRP výztuží od různých výrobců s rozdílnými vlastnostmi a povrchovými úpravami, které mohou mít velmi rozdílné charakteristiky soudržnosti, což značným způsobem determinuje chování výztuže v konstrukci, a tedy i její statický návrh. Bohužel se na našem trhu vyskytují i produkty, u kterých nejsou tyto klíčové charakteristiky výrobcem deklarované.

Prezentované výsledky byly získány za finanční podpory projektu TH03020067 „FRP výztuž se zvýšenou spolehlivostí a trvanlivostí při vysokocyklickém zatížení“ a FAST-J-18-5224 „Zkouš-

ka interlaminárního smyku FRP prutů pro rychlé a efektivní hodnocení kvality produktu a stanovení míry degradace”.

Ing. Ondřej Januš
e-mail: janus.o@fce.vutbr.cz



Ing. František Girgle, Ph.D.
e-mail: girgle.f@fce.vutbr.cz



Ing. Vojtěch Kostiha
e-mail: kostiha.v@fce.vutbr.cz



prof. RNDr. Ing. Petr
Štěpánek, CSc., dr. h. c.
e-mail: stepanek.p@fce.vutbr.cz



Ing. Pavel Šulák, Ph.D.
e-mail: sulak.p@fce.vutbr.cz



Ing. Mohamad Mansour
e-mail: mohadamansour
@hotmail.com



všichni: Fakulta stavební VUT v Brně

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