

VYUŽITÍ KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ PRO ZESILOVÁNÍ ŽELEZOBETONOVÝCH KONSTRUKCÍ USE OF FIBRE - REINFORCED POLYMERS FOR STRENGTHENING OF REINFORCED CONCRETE STRUCTURES

PAVEL DOHNÁLEK

V současné době je ve světě a zejména ve vyspělých zemích velké množství chátrajících objektů, které budou muset být v nejbližších letech opraveny, pokud má jejich používání v budoucnu pokračovat. Tyto objekty se řadí do mnoha kategorií, ale nejzávažnější jsou postižené objekty v oblasti průmyslu a dopravní infrastruktury, které jsou většinou železobetonové. Potřebují nejenom opravu a navrácení původních vlastností, ale většinou jsou i přetížené, např. dálniční mosty, a je tudíž nutné také jejich zesílení. Tento vážný a stále se zhoršující stav si žádá inovativní řešení, které by umožnilo rychlou, nákladově efektivní a trvanlivou opravu postižených konstrukcí tak, aby mohlo dojít k obrácení negativního trendu. Jednou z metod, která je ve světě viděna jako odpověď na tento závažný problém, je použití kompozitních materiálů pro zesilování konstrukcí zejména železobetonových, ale také zděných či dřevěných.

There are currently numerous decaying constructions worldwide, particularly in developed countries. If the exploitation of these constructions is to continue, they will have to be repaired in the nearest future. Such constructions fall into many categories; the most seriously damaged structures, though, belong to industry and transport infrastructure, and they are predominantly made of reinforced concrete. First of all, they need to be repaired and gain back their original characteristics. However, they are also mostly overloaded, for example in the case of motorway bridges, and therefore need strengthening. This grave, constantly worsening condition requires an innovative solution which would facilitate a fast, cost-effective and durable repair of damaged structures so that the negative trend is averted. One of the methods considered as an answer to this serious problem is the use of composite materials for strengthening of the structures, primarily reinforced concrete ones, but also masonry or timber ones.

Vývoj vláknů vyztužených plastů, anglicky Fiber-Reinforced Polymers (dále jen FRP) začal během II. světové války. Rychle rostoucí petrochemický průmysl vyvinul tyto materiály především pro použití v americkém vesmírném programu a armádním letectví. V osmdesátých letech minulého století pak snižující se ceny těchto materiálů umožnily jejich postupné rozšíření do civilního letectví, automobilového průmyslu, oblasti sportovních potřeb a v neposlední řadě také do stavebnictví. Počáteční výzkum využití FRP ve stavebnictví byl prováděn především v USA, Japonsku a západní Evropě, v prvních dvou případech bylo motivací také zesilování staveb pro odolání seismickým zatížením. V současné době je v těchto zemích zesilování s FRP velice rozšířené a v omezené míře se tyto materiály používají i pro novostavby. Rozšíření používání FRP ve stavebnictví také dokazuje fakt, že stavebnictví je druhým největším odběratelem kompozitních materiálů po leteckém průmyslu. Vzhledem k rychle rozšiřujícímu se používání těchto materiálů ve stavebnictví mnoha zemí se všeobecně předpokládá, že v nejbližších několika letech se stavebnictví stane jejich největším odběratelem.

Technika zesilování s FRP principiálně navazuje na metodu zesilování betonových konstrukcí externími ocelovými pláty, oproti které má řadu podstatných výhod, např.: rychlejší aplikaci, mnohem snazší instalaci, která nevyžaduje použití permanentního lešení, podpor během lepení ocelových plátů a tudíž značně šetří čas pracovníků. S tím souvisí i omezení doby potřebné pro rekonstrukci či zesílení, podstatné hlavně v průmyslových provozech a u dopravních staveb, kde dlouhá odstávka nebo uzavírka je velkým problémem. V dnešní době jsou také velice podstatné úspory na dopravních nákladech dané nízkou vahou těchto materiálů v porovnání s jejich mechanickými vlastnostmi. Dalším podstatným pozitivem této metody je také téměř neznatelné přetížení zesilované konstrukce díky nízké relativní hmotnosti kompozitních materiálů a také zanedbatelná

změna profilu vzhledem k použití FRP lamel o tloušťce většinou v řádu několika milimetrů.

KOMPOZITNÍ MATERIÁLY

Jak již jejich název naznačuje, kompozitní materiály jsou komponované dvěma nezávislými fázemi, a to vlákny a pojivem. Vlákna dodávají kompozitním materiálům jejich výborné mechanické vlastnosti, jelikož mají vysoce orientovanou chemickou strukturu, jež má vynikající vlastnosti v tahu při velmi nízké váze. Naopak pojivo v tomto případě zajišťuje přenos napětí mezi jednotlivými vlákny a zajišťuje jejich chemickou a mechanickou ochranu, propůjčující FRP dlouhodobou trvanlivost a odolnost vůči agresivním prostředím. Svoji stavbou jsou tyto materiály předurčeny k použití především v tahu, kdy je plně využito výborných vlastností vláken. Při ostatních zatíženích přebírá hlavní nosnou úlohu pojivo s mnohem nižšími hodnotami mechanických vlastností.

V dnešní době jsou pro výrobu FRP pro stavebnictví běžně používány tři druhy vláken: vlákna skelná, aramidová a karbonová. Tato vlákna jsou pak kombinována s celou řadou pojiv, z kterých jsou nejběžnější epoxidy a polyestery. Kombinací různých druhů vláken a pojiv lze pak docílit velice rozmanité hodnoty mechanických vlastností, ceny a trvanlivosti. Z mechanických vlastností FRP jsou důležité především pevnost v tahu, modul pružnosti a plně elastické chování až po mezní zatížení. Modul pružnosti se pohybuje ve velmi širokém rozpětí mezi 38 GPa pro skelná vlákna s polyestrovým pojivem až po 155 GPa pro karbonová vlákna s epoxidovým pojivem. Pevnost v tahu se pak pro výše jmenované materiály pohybuje mezi 900 MPa a 2700 MPa. Z dalších zajímavých vlastností můžeme jmenovat koeficient teplotní roztažnosti blízký nule pro některé kombinace vláken a pojiv. Další velice důležitou vlastností FRP je jejich rychlá ztráta mechanických vlastností při vysoké teplotě a z toho vyplývající problémy s odolností takto zesílené konstrukce vůči požáru. Tento problém je ale řešitel-

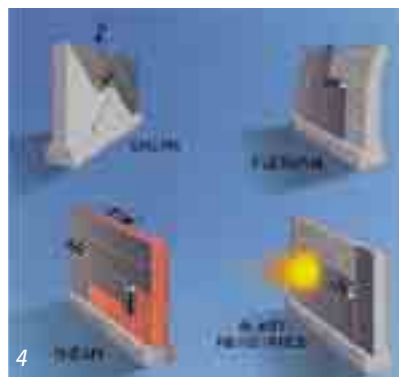
Obr. 1, 2 Příklady zesílení vodorovných nosných prvků kompozity
Fig. 1, 2 Examples of strengthening of horizontal structural members with FRP [1]



ný s pomocí speciálních nátěrů či nástřiků vnějšího povrchu FRP lamel.

V současné době jsou nejrozšířenější materiály kombinující karbonová vlákna s epoxidovým pojivem, jejichž mechanické vlastnosti i trvanlivost jsou v mnoha ohledech nejlepší. Tyto vlastnosti jsou pak vyváženy relativně nejvyšší cenou mezi kompozitními materiály pro stavebnictví. Samozřejmě ne všechny aplikace vyžadují tyto maximální hodnoty mechanických vlastností a trvanlivosti a mohou tedy použít materiály cenově dostupnější.

Mezi nejvýznamnější výrobce FRP pro stavebnictví ve světě patří švýcarská SIKA (www.sika.com) s karbonovými lamelami CarboDur a dvousložkovým epoxidovým lepidlem SikaDur, na americkém trhu je pak významná např. společnost FYFE (www.fyfeco.com) s karbonovými lamelami a dvousložkovými epoxidy řady Tyfo. K dalším významným společnostem patří americká společnost Watson Bowman Acme Corp. (www.mbrace.com), vyrábějící zesilující FRP systém pro železobeton pod značkou Mbrace, dále pak společnost Hughes Brothers (www.hughesbros.com), produkující materiály FRP pod komerčním názvem Aslan nebo



britská FiberForce Composites (www.fiberforce.co.uk), nabízející jak FRP lamely, tak rozmanitou škálu ostatních profilů.

Využití

Jak již bylo řečeno, FRP lze využít pro zesílení mnoha druhů stavebních materiálů, především však konstrukcí železobetonových, zděných nebo dřevěných. Kromě zesílování jsou FRP stále častěji využívány v novostavbách, a to zejména v chemicky agresivních prostředích, nebo pokud je celková váha konstrukce limitována.

Kompozitní materiály lze použít pro

Obr. 3, 4 Příklady zesílení vertikálních nosných prvků pomocí kompozitních materiálů

Fig. 3, 4 Examples of strengthening of vertical structural members with FRP [1]

zesílování železobetonových konstrukcí několika různými způsoby. Důležitá je vždy orientace hlavních nosných vláken kompozitu ve směru nejvyššího napětí tak, aby byl plně využit jejich potenciál. Vzhledem k tomu, že kompozitní materiály mají většinou vlákna oriento-

BETOSAN[®]
alternativa, kterou oceníte

www.betosan.cz

HYDROIZOLAČNÍ MALTY

na PCC bázi s přísadami XYPEX®
ruční zpracování – WATERFIX XP,
WATERFIX XP TH, DENSOFIX XP

na PC bázi s přísadami XYPEX®

strojní nástřik – MONOCRETE MONOMIX XP
MONOCRETE MONOMIX XP TH

TRVALE PRUŽNÉ HYDROIZOLAČNÍ STĚRKY

2 složky na PCC bázi WATERFIN PV
1 složka na polymerní bázi IZOLASTIC flex

OPRAVA A ÚDRŽBA PLOCHÝCH STŘECH

1 složka na polymerní bázi ELASTOFIN

LOKÁLNÍ UTĚSNĚNÍ

na PCC bázi s přísadami WATERFIX RH

DRŽITEL CERTIFIKÁTŮ ČSN EN ISO 9001:2001



CERTIFIKOVANÉ
HYDROIZOLAČNÍ
MATERIÁLY,
OCHRANA
PROTI RADONU



TRVALE PRUŽNÝ HYDRO-
IZOLAČNÍ LEPÍCÍ TMEL
NA HUTNOU DLAŽBU A SKLO

2 složky na PCC bázi WATERFLEX

MRAZUVZDORNÝ LEPÍCÍ TMEL

interiér/exteriér

1 složka na PCC bázi – PROFIX

MRAZUVZDORNÁ SPÁROVACÍ HMOTA

interiér/exteriér

1 složka na PCC bázi – PROFILL

OBCHODNĚ-TECHNICKÁ KANCELÁŘ

Na Dolínách 23
147 00 Praha 4

mobil: 602 121 617
tel./fax: 241 431 212
e-mail: praha@betosan.cz



Obr. 5 Železobetonová deska zesílená použitím FRP lamel

Fig. 5 Reinforced concrete slab strengthened with FRP strips [2]

vaná pouze v jednom nebo ve dvou na sebe kolmých směrech, je velmi důležitý detailní návrh zesílení s případným použitím více vrstev FRP s vlákny orientovanými více směry.

Praktické použití FRP pro zesilování přibližují obr. 1 až 4. Například průvlaky mohou být zesíleny v tahových zónách pro zvýšení ohybové pevnosti, nebo ve smykových zónách pro zvýšení smykové pevnosti (obr. 1). Železobetonové desky pak mohou být zesíleny aplikací FRP v tahových zónách (obr. 2). U železobetonových sloupů může být dosaženo jak zvýšení osově pevnosti, tak pevnosti v ohybu pomocí FRP lamel, nalepených jak v osovém, tak v příčném směru (obr. 3). V případě stěn pak může zesílení pomocí FRP dosáhnout zvýšení ohybové a smykové pevnosti a také částečně chránit beton před účinky exploze.

ZPŮSOBY APLIKACE

Materiály FRP se vyrábějí a aplikují třemi způsoby. První metoda používá FRP ve formě finálních lamel či desek lepených pomocí většinou dvousložkových epoxidových lepidel na betonovou konstrukci. Lamely či desky jsou tak vyrobeny ve své konečné podobě přímo na lince výrobce, čímž je zajištěna jejich kvalita a rovnoměrnost. Nejběžnějším výrobním procesem FRP je proces, anglicky nazývaný „pultrusion.“ Tento kontinuální proces sestává z protahování pramenů vláken nejprve tekutým pojivem, které je pak ve finálním průřezu vytvrzeno v tepelné matrici a proces končí zakrácením materiálu na požadovanou délku.

Druhou metodou je aplikace vláken či vláknenných tkanin a pojiva přímo na



Obr. 6 Železobetonový oblouk zesílený obalením FRP laminátem

Fig. 6 Reinforced concrete arch strengthened with FRP sheet wrap [2]

místě použití. Tato metoda umožňuje velkou variabilitu, co se týče tvarů zpevněvané konstrukce, nebo výsledných vlastností zesílení, daných orientací vláken a počtem jejich vrstev. Nevýhodou je pak těžko kontrolovatelná kvalita tohoto druhu zesílení, které může obsahovat vzduchové kapsy a tudíž mít horší a nerovnoměrné vlastnosti. Dalším negativním faktorem je relativní pracnost.

Třetím způsobem je pak aplikace vláken smáčených v nevytvrzlém pojivu

přímo od výrobce a jejich následná finalizace pomocí tlaku nebo tepla na místě aplikace. Předsmačení vláken pojivem přímo výrobcem zajišťuje konzistentnější kvalitu smáčení a částečně eliminuje možnost vzniku vzduchových kapes, a tudíž produkuje kvalitnější zesílení.

Z výše uvedených aplikačních postupů je nejvíce oblíbený postup lepení předem vyrobených lamel či desek na betonovou konstrukci. To je dáno jeho mnoha výhodami, zaručenou kvalitou kompozitních lamel, nízkou pracností, a tudíž rychlou aplikací s nízkými náklady na pracovní sílu. Vzhledem k tomu, že FRP lamely nebo desky jsou v tomto případě konzistentně kvalitní a s vysokými hodnotami modulu pružnosti a pevnosti v tahu, je nutné pro využití jejich plného potenciálu

Literatura:

- | | |
|---|--|
| <p>[1] <i>Market Development Association (MDA): FRP Product Gateway</i>, http://www.mdacomposites.org/PSGbridge_concreterepair_intro.html</p> <p>[2] <i>Tony Gee and Partners</i>: http://www.tgp.co.uk/feature/cfrp2/cfrp.feet.html</p> <p>[3] <i>Peters S. T.: Handbook of Composites</i>, 2nd Edition, Chapman and Hall, 1998</p> <p>[4] <i>U.S. Army Corp of Engineers: Engineering and Design: Composite Materials for Civil Engineering Structures</i>, ETL 1110-2-548, Březen 1997</p> <p>[5] <i>NCHRP 10-59: Research Initiative: Construction Specifications for Bonded Repair and Retrofit of Concrete Structures Using FRP Composites</i>, National Cooperative Highway Research Program, Spojené Státy Americké, 2004</p> <p>[6] <i>Karbhari V. M., Chin J. W., Huston D., Benmokrane B., Juska T., Morgan, R., Lesko J. J., Sorathia U., Reynaud D.: Durability Gap Analysis for Fiber-Reinforced Polymer Composites in Civil Infrastructure</i>, <i>Journal of Composites for Construction</i>, Ročník 7, Číslo 3, Stránky 238–246, 2003</p> <p>[7] <i>Bonacci J. F., Maalej M.: „Externally</i></p> | <p><i>Bonded FRP for Service-Life Extension of RC Infrastructure</i>“, <i>Journal of Infrastructure Systems</i>, Ročník 6, Číslo 1, Stránky 41–51, 2000</p> <p>[8] <i>Myers J. J., Murthy S., Micelli F.: „Effect of Combined Environmental Cycles on the Bond of FRP Sheets to Concrete“</i>, Příspěvek konference <i>Composites In Construction</i>, Porto, Portugalsko, 10.–12. října, 2001</p> <p>[9] <i>Buyukozturk O., Hearing B.: „Crack propagation in concrete composites influenced by interface fracture parameters“</i>, <i>International Journal of Solids and Structures</i>, Ročník 35, Číslo 31–32, Stránky 4055–4066, 1998</p> <p>[10] <i>Buyukozturk O., Hearing B.: „Failure Behavior of Precracked Concrete Beams Retrofitted with FRP“</i>, <i>Journal of Composites for Construction</i>, Ročník 2, Číslo 3, Stránky 138–144, 1998</p> <p>[11] <i>Buyukozturk O., Gunes O., Karaca E.: „Progress on understanding debonding problems in reinforced concrete and steel members strengthened using FRP composites“</i>, <i>Construction and Building Materials</i>, Ročník 18, Číslo 1, Stránky 9–19, 2004</p> |
|---|--|

lu věnovat maximální pozornost přípravě povrchu betonu a výběru vhodného lepidla, jelikož spoj mezi betonem a kompozitem je kritickým místem celého třífázového systému.

VÝZKUM A NORMALIZACE

Samozřejmým předpokladem širokého uplatnění FRP ve stavebnictví je výzkum, který umožňuje postupnou normalizaci těchto materiálů, lepidel, postupů navrhování zesílení pomocí FRP i následné aplikace. Normalizace pak umožňuje nejenom rychlejší a kvalitnější navrhování, ale především přináší postupný nárůst důvěry odborné veřejnosti i investorů, a tím možnost pro další rozšíření této metody.

Z hlediska výzkumu jsou nejlépe prostudované vlastnosti samotných FRP, které byly po řadu desetiletí používány v mnohem extrémnějších podmínkách v letectví a kosmonautice [3]. Také vlastnosti stavebních lepidel, např. dvousložkových epoxidů, jsou všeobecně známé. Mnohem důležitější je ale společné chování tohoto třífázového systému, jehož počáteční vlastnosti byly prostudovány velice zevrubně v mnoha experimentálních programech v posledních dvou desetiletích [4, 5]. Na druhé straně dlouhodobá trvanlivost (v řádech desítek let) celého zesilovacího systému v různých extrémních klimatických podmínkách či chemicky agresivních prostředích nebyla dosud plně

prostudována a výzkum v této oblasti stále pokračuje [6 až 8]. Výzkum trvanlivosti zesílení pomocí FRP v současné době probíhá také na Massachusetts Institute of Technology pod vedením profesora O. Buyukozturka [9 až 11]. Konkrétně se tato výzkumná skupina zaměřuje na vliv vysoké relativní vlhkosti, vysoké teploty nebo cyklického zmrazování na mechanické vlastnosti lepeného spoje mezi betonovým podkladem a FRP.

Tak, jak postupuje výzkum této zesilovací metody, pokračuje i vývoj v oblasti norem standardizujících tuto oblast. Ve Spojených státech jde v současné době především o směrnice American Concrete Institute (ACI) komise 440 „Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures“ a také o výzkumnou iniciativu National Cooperative Highway Research Program (NCHRP) 10-59. „Construction Specifications for Bonded Repair and Retrofit of Concrete Structures Using FRP Composites“. V Evropě pak například Comité Euro-International du Béton (CEB-FIB) bulletin číslo 14 – „Externally bonded FRP reinforcement for RC structures“. V České republice se v současné době připravují technické podmínky Ministerstva dopravy ČR pro přípravu, projektování a provádění zesilování nosných konstrukcí betonových mostů a lávek.

ZÁVĚR

Zesilování železobetonových konstrukcí pomocí FRP je v mnoha ohledech atraktivní metoda, která je jednou z odpovědí na špatný a rychle se zhoršující stav světové infrastruktury. Jejími hlavními výhodami jsou výrazné zesílení, trvanlivost, chemická odolnost, variabilita, rychlá aplikace, a tudíž nízké mzdové náklady, které by měly vyvážit vyšší náklady na materiál. Za nevýhody lze v současné době považovat především malou zkušenost projektantů a odborné veřejnosti s touto metodou, danou také teprve se rozvíjejícími standardy a normami. S postupným rozšířením kvalitních standardů a norem a se současným nárůstem praktických zkušeností s touto metodou lze do budoucna očekávat velký nárůst používání FRP pro zesilování a opravy betonových, cihelných či dřevěných konstrukcí. Následně lze také očekávat větší využití těchto materiálů v novostavbách, např. jako výztuž pro beton nebo jako samostatné profily.

Pavel Dohnálek

student stavebního inženýrství

Massachusetts Institute of Technology

#16 2031 Commonwealth Avenue

Brighton, Massachusetts 02135 U.S.A.

e-mail: pdohnale@mit.edu

POUŽITÍ SAMOZHUTNITELNÉHO BETONU PŘI OPRAVĚ MOSTU

Během léta 2004 byl ve Finsku opravován 155 m dlouhý a 25 m široký zavěšený Sääksmäki Bridge postavený v šedesátých letech 20. století (obr. 1). Při opravě došlo ke změně statického schématu mostu monolitickým spojením mostovky se ztužujícími nosníky v tzv. kompozitní konstrukci.



K opravě mostu byl použit samozhutňující beton K35. Husté uspořádání výztuže (395 kg/m^3 nebo $82 \text{ kg/m}'$) omezilo max. velikost použitého kameniva na 16 mm (obr. 2). Průběžně prováděné výrobní zkoušky betonu při dodávkách na stavbu za přítomnosti zástupce betonárny potvrzovaly hodnoty materiálových charakteristik naměřené během laboratorních zkoušek. Ztužující pásy byly betonovány kontinuálně během pozdních večerních hodin v týdnu na přelomu června a července, kdy bylo stále počasí, dostatek světla a v pozdních denních hodinách bylo možno omezit automobilový provoz. Protože bylo třeba omezit zatížení i chvění mostu, mohl být na mostě vždy pouze jeden automobíl. Betonáž dopadla dobře a na podzim našla kontrola na 220 m dlouhých pásích pouze několik málo trhlinek – bylo jich méně než předpokládal projekt.



jm

Beton 1/2005, str. 44–45