

ZESILOVÁNÍ BETONOVÝCH KONSTRUKCÍ POMOCÍ KOMPOZITNÍHO MATERIÁLU - UHPC

Daniel Samek, *

Katedra betonových a zděných konstrukcí, Fakulta stavební,
České vysoké učení technické v Praze, Thákurova 7/2077, 166 29 Praha 6, Česká republika.
daniel.samek.1@fsv.cvut.cz

ABSTRAKT

Zesilování konstrukcí pomocí nabetonávky z ultra-vysokohodnotného vláknobetonu (UHPFRC) je inovativní metodou, která umožňuje zvýšit jejich únosnost a odolnost. Tato metoda vyžaduje optimalizaci tloušťky nabetonávky a správné propojení mezi novou vrstvou UHPFRC a stávající konstrukcí. Výzkum v této oblasti se zaměřuje na identifikaci vhodných typů konstrukcí, optimalizaci tloušťky nabetonávky a zkoumání pevnosti spojení mezi vrstvami.

KLÍČOVÁ SLOVA

Betonové mosty • Zesilování • Obnova • Ultra-vysokohodnotný vláknobeton • UHPFRC nabetonávka

ABSTRACT

Strengthening structures using an overlay of ultra-high performance fiber-reinforced concrete (UHPFRC) is an innovative method that allows for increasing their load-bearing capacity and durability. This method requires optimization of the overlay thickness and proper bonding between the new UHPFRC layer and the existing structure. Research in this area focuses on identifying suitable types of structures, optimizing overlay thickness, and investigating the strength of connections between layers.

KEYWORDS

Concrete bridges • Strengthening • Rehabilitation • Ultra-High Performance Fibre Reinforced Concrete • UHPFRC overaly

1. ÚVOD

Vyztužené betonové konstrukce, vykazují vynikající vlastnosti z hlediska konstrukčního chování. Pokud jsou tyto konstrukce vystaveny silným vlivům okolního prostředí a vysokému mechanickému namáhání, může docházet nejen ke snížení jejich konstrukčních odolností, ale i jejich životnosti. Obnova a rekonstrukce takto poškozených betonových konstrukcí je pro společnost velkou zátěží především z ekonomického hlediska. K významným nákladům pro správce těchto

konstrukcí vede nejen výstavba nových, ale především velký počet existujících mostních konstrukcí. Aby bylo možné snižovat tuto zátěž na minimum a zároveň se efektivně starat o mostní konstrukce pro zajištění jejich spolehlivosti a provozuschopnosti, tak je zapotřebí zpřesňovat informace o jejich dlouhodobém působení a vlivu poruch na jejich působení. Dále je důležité rozvíjet možnosti jejich oprav, úprav a zesilování.

Vyztužené betonové konstrukce, jako jsou mosty, budovy, průmyslové objekty, vodohospodářské stavby a další, vynikají z hlediska konstrukčního chování. Avšak vlivem okolního prostředí a mechanického zatížení se jejich odolnost a životnost snižují. Obnova a rekonstrukce těchto konstrukcí je ekonomicky náročná, a proto je důležité zpřesňovat informace o jejich dlouhodobém působení a poruchách a rozvíjet možnosti jejich oprav a zesilování.

V posledních letech se vyvíjí materiály na bázi cementu s výjimečnými mechanickými vlastnostmi a trvanlivostí - ultra-vysokohodnotné betony (UHPC). UHPC se používají jako kompozitní materiály vyztužené vlákny (UHPFRC). Tyto materiály se vyznačují:

- Vysokou pevností v tlaku (až 180 MPa)
- Vysokou pevností v tahu (10-15 MPa)
- Nízkou propustností
- Odolností proti agresivním vlivům prostředí

UHPFRC je ideální materiál pro zvýšení životnosti a únosnosti konstrukcí. Jednou z metod je zesílení konstrukce pomocí UHPFRC nabetonávky, kdy se na stávající konstrukci nanáší tenká spřažená vrstva. Tato metoda umožňuje:

- Zvýšení únosnosti a odolnosti konstrukce
- Prodloužení životnosti konstrukce
- Snížení nákladů na údržbu
- Rychlou a efektivní metodu
- Možnost použití v obtížně dostupných místech

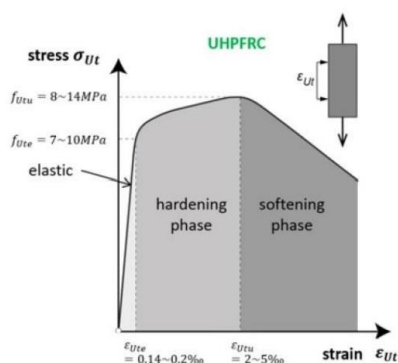
Zesilování konstrukcí pomocí UHPC je inovativní a efektivní metoda, která umožňuje prodloužení životnosti a zvýšení únosnosti široké škály konstrukcí s nízkými náklady na údržbu. [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10]

* Školitel: doc. Ing. Iva Broukalová, Ph.D.

2. ULTRA-VYSOKOHODNOTNÝ VLÁKNOBETON

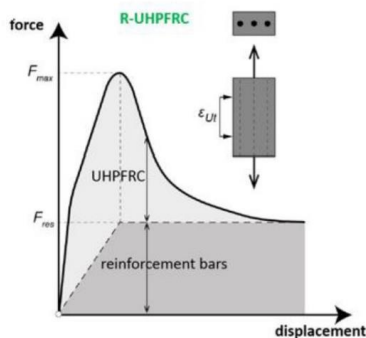
Ultra-vysokohodnotný vláknobeton (UHPFRC) se řadí mezi inovativní materiály, které otevírají dveře k revolučním řešením v oblasti stavebnictví. Vyniká především výjimečnou pevností, odolností a flexibilitou, čímž umožňuje navrhovat dříve nepředstavitelné konstrukce.

Pevnost v tlaku UHPFRC dosahuje až 180 MPa, což je více než pětinasobek běžného betonu. Pevnost v tahu za ohybu se pohybuje okolo 15 MPa, desetinásobně více než u běžných materiálů. Díky tomu je UHPFRC ideální pro konstrukce s vysokým zatížením a odolností proti opotřebení.



Obrázek 1: Pracovní diagram nevyztuženého UHPC – v tahu [11]

Nízký vodní součinitel a kvalitní materiály zaručují mimořádnou odolnost UHPFRC proti agresivním prostředím a pronikání vody. Prodloužená životnost konstrukcí z UHPFRC je několikanásobně delší než u běžných betonů, čímž se snižují náklady na údržbu a opravy.

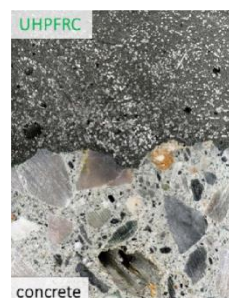


Obrázek 2: Pracovní diagram vyztuženého UHPC – v tahu [11]

UHPFRC umožňuje navrhovat tenkostěnné a elegantní konstrukce s neomezenými možnostmi tvarování. Díky tomu se otevírají dveře k inovativní architektuře a designu, které posouvají hranice stavebnictví do dříve nepředstavitelných oblastí.

Základem UHPFRC je portlandský cement, jemné kamenivo s vysokou pevností (často čedič), plastifikátory pro zlepšení zpracovatelnosti a příměsi pro dosažení optimální hustoty

(popílek, mikrosilika, nanosilika). Klíčovou součástí je rozptýlená výztuž ve formě vláken, nejčastěji ocelových, která zajišťuje vysokou pevnost, duktilitu a zabraňuje vzniku mikrotrhlin.



Obrázek 3: Porovnání normálního betonu a UHPC v řez [11]

I přes nesporné výhody má UHPFRC i svá úskalí. Vysoká cena materiálu a náročná výroba zatím brání jeho širšímu rozšíření. Také specifické znalosti a technologie potřebné pro práci s UHPFRC představují jistou překážku. Přesto má UHPFRC velký potenciál stát se materiálem budoucnosti. Umožňuje navrhovat inovativní a trvalé konstrukce, zkracuje dobu výstavby a přispívá k udržitelnosti a ekologické šetrnosti stavebnictví. [13, 14, 15]

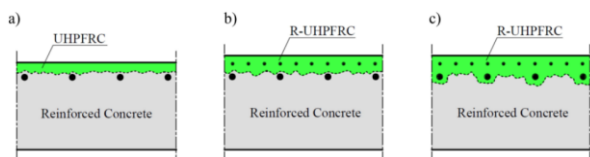
3. ZESILOVÁNÍ POMOCÍ NABETONÁVKY

Principem zvyšování únosnosti a životnosti stávajících betonových mostů pomocí nabetonávky z UHPFRC je přidání vrstvy betonu na již existující, poškozenou nebo málo únosnou konstrukci. Zesílení pomocí nabetonávky se uplatňuje tam, kde lze nejlépe využít vlastnosti UHPFRC, a to především na částech konstrukcí vystavených silným účinkům vnějšího prostředí, jako jsou voda či rozmrazovací soli, a velkému mechanickému zatížení včetně lokálních sil a nárazů.

Způsob provedení a tloušťka nabetonávky závisí na rozsahu poškození stávající konstrukce a účelu použití UHPFRC nabetonávky, která se využívá jak k zvýšení únosnosti konstrukce, tak i jako ochranná a vodotěsná vrstva na povrchu.

Pokud má nová vrstva nabetonávky z UHPFRC sloužit pouze k ochraně podkladového betonu před pronikáním vody a chloridů, postačí vrstva o tloušťce 25 až 40 mm. Avšak v případě, že má být nabetonávka vložena za účelem zvýšení konstrukční odolnosti a je v ní zahrnuta ocelová výztuž, musí být její tloušťka minimálně 40 mm a zároveň musí být zaručeno krytí výztuže minimálně 15 mm.

V případě, že je na konstrukci poškozena výztuž korozi nebo beton vysokou kontaminací chloridů, je možné takto poškozenou výztuž a beton odstranit do požadované hloubky a následně provést sanaci pomocí vrstvy UHPFRC a nové výztuže. Hloubka odstranění degradované vrstvy betonu závisí na rozsahu poškození a tloušťka nové vrstvy se přizpůsobí potřebě zesílení, a je možné ji tak upravit podle konkrétní situace.



Obrázek 4: Nabetonávka z UHPFRC: a) Ochranná funkce b) Zesílení a ochranná funkce c) Zesílení a ochranná funkce s nově vloženou výztuží [1]

Pro zajištění optimálního spojení obou vrstev, jak starého betonu, tak nové nabetonované vrstvy z UHPFRC, je nutné zajistit správné propojení mezi těmito vrstvami. Toho lze dosáhnout pískováním, vysokotlakým tryskáním vodou nebo broušením kontaktní plochy podkladového betonu. Drsnost takto upraveného povrchu by měla dosahovat 3 až 5 mm. [1, 4, 5]



Obrázek 5: Povrchová úprav betonu - zleva: nízkotlaký vodní paprsek, tryskání pískem, vysokotlaký vodní paprsek [12]

Následně je třeba odstranit veškeré uvolněné částice a látky, které by mohly oslabit spojení mezi vrstvami. Před samotnou betonáží nabetonávky by měl být podklad dostatečně navlhčen, aby došlo ke správnému spojení obou vrstev.

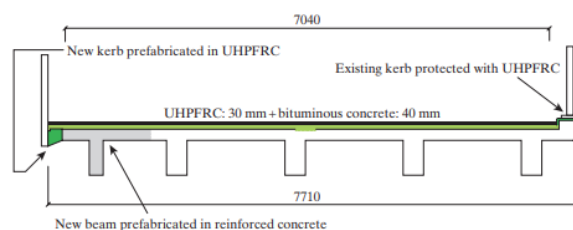
Styčné spáry by také měly být většinou opatřeny sprahovací výztuží. V případě, že by tomu tak nebylo, by mohlo dojít k oddělení nabetonávky od podkladu, například vlivem dynamických a opakovaných zatížení, a rozdílných deformací mezi původní konstrukcí a nabetonávkou.

4. PŘÍKLADY POUŽITÍ

Technologie zesílení a zvýšení životnosti pomocí vrstvy UHPFRC byla poprvé použita v roce 2004 ve Švýcarsku na mostě přes řeku La Morge. Od té doby bylo pomocí nabetonávky zesíleno více než 50 konstrukcí. Touto metodou bylo zesíleno i několik mostů ve Slovinsku, ve Francii a v USA. [1, 10]

4.1. Most přes řeku La Morge

V roce 2004 byla ve Švýcarsku poprvé použita technologie UHPFRC (ultra-vysokohodnotný vláknobeton) pro rehabilitaci a rozšíření silničního mostu o délce 10 m přes řeku La Morge. Most byl rozšířen prefabrikovaným železobetonovým nosníkem, který byl spojen s prefabrikovaným římsovým nosníkem z UHPC. Povrch mostovky znečištěný chloridy byl odstraněn, ošetřen tryskáním a nahrazen 30 mm vrstvou UHPC. Celá rehabilitace trvala jeden měsíc a funkčnost UHPC byla ověřena zkouškami propustnosti vzduchu. [10]



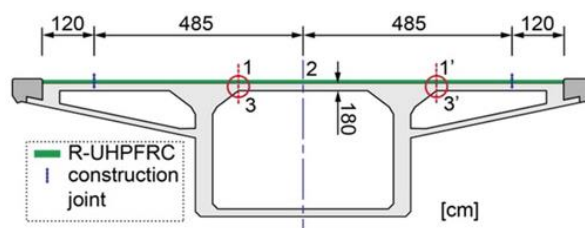
Obrázek 6: Příčný řez mostem po sanaci pomocí UHPFRC [10]

4.2. Chillon viadukt

Chillonské viadukty představují dva paralelní předpjaté betonové dálniční mosty o celkové délce 2120 metrů, které byly dokončeny v období mezi lety 1966 a 1969. Konstrukce betonových částí prokázala známky alkalické reakce kameňiva, což vedlo k oslabení struktury betonu a snížení jeho pevnosti v průběhu času. S cílem zajistit bezpečnost a spolehlivost konstrukce byla zvolena metoda posílení mostů přidáním vrstvy ultra-vysokopevnostního vláknobetonu (UHPFRC), a to s ohledem na dobu trvání zásahu a náklady.

Posílení konstrukce proběhlo v letech 2014 a 2015 a jeho hlavními cíli bylo zvýšení ohybové a smykové odolnosti v příčném směru, zvýšení tuhosti konstrukce, snížení napětí ve výztuži, zajištění vodotěsnosti pro zlepšení trvanlivosti a zkrácení času potřebného k dokončení prací. Nabetonávka byla provedena pomocí jedné vrstvy o celkovém objemu 2350 m³, aplikované pomocí upraveného silničního finišeru. Před uložením betonu byla odstraněna vrstva krycího betonu tloušťky 10 mm a povrch byl očištěn vysokotlakým vodním paprskem.

Celková tloušťka horní desky komorového nosníku činí 180 mm, přičemž vrstva nabetonávky má tloušťku 40 mm a obsahuje příčnou ocelovou výztuž o průměru 12 mm. Nad pilíři byla tloušťka nabetonávky zvětšena na 50 mm a byly přidány podélné ocelové pruty o průměru 12 mm pro zvýšení momentové únosnosti.



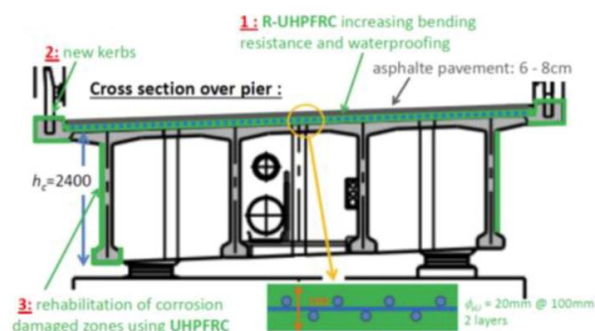
Obrázek 7: Příčný řez mostem po opravě s UHPFRC [1]

Díky provedeným úpravám došlo k zvýšení příčného momentu únosnosti v řezu 1 o 73 % a v řezu 2 o 33 %. Smyková únosnost byla zvětšena o 40 % a ohybová únosnost komorového nosníku se zvýšila o 20 %. [1, 2]

4.3. Dálniční mosty ve Švýcarsku

V letech 2017 až 2019 byla v rámci Švýcarska provedena rehabilitace tří dálničních mostů, jejichž vznik se datuje téměř před padesáti lety, přičemž celková délka těchto mostů dosahuje 1050 metrů. Konstrukčně jsou tyto mosty tvořeny čtyřmi prefabrikovanými předpjatými nosníky o délce 40 metrů, které

v podélném směru působí jako spojitý nosník. Zjištěné škody na výztuži mostů a zohlednění budoucích dopravních zatížení ukázaly, že mosty nevyhovují požadavkům na zatížitelnost.



Obrázek 8: Příčný řez nad pilířem - rozsah opravy [1]

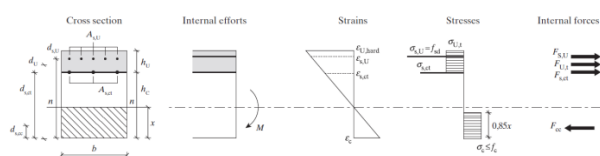
Rehabilitace byla zaměřena na zvýšení únosnosti a torzní tuhosti pomocí rozšíření vrstvy ultra-vysokopevnostního vláknobetonu (UHPFRC), který zároveň slouží jako hydroizolační vrstva. V polích mostů byla aplikována nabetonávka o tloušťce 45 mm s příčnou výztuží. Nad pilíři byla provedena vrstva o tloušťce 100 mm s vloženou příčnou a podélnou výztuží pro zvýšení momentu únosnosti, což umožňuje plastické přerozdělení momentů z polí nad pilíři. UHPFRC bylo rovněž použito k opravě lokálních poškození nosníků. [1]

5. VÝZKUM ZESILOVÁNÍ KONSTRUKCÍ POMOCÍ NABETONÁVKY Z UHPFRC

V rámci výzkumu zesilování konstrukcí pomocí nabetonávky z ultra-vysokohodnotného vláknobetonu (UHPFRC) se zaměřujeme na optimalizaci tloušťky nabetonávky a vliv typu konstrukce na účinnost zesílení. Tato kapitola představuje současný stav poznání a hlavní směry výzkumu v této oblasti.

5.1. Optimalizace tloušťky nabetonávky

Studie se zabývají vlivem tloušťky nabetonávky na její účinnost při zesilování konstrukce. Cílem je nalézt optimální tloušťku nabetonávky pro různé typy konstrukcí a úrovně poškození. Experimentální a numerické analýzy jsou prováděny za účelem stanovení minimální tloušťky nabetonávky potřebné k dosažení požadovaných úrovní zesílení a životnosti konstrukce.



Obrázek 9: Analýza rovinného zesíleného průřezu v ohybu [11]

5.2. Typ konstrukce a tloušťka nabetonávky

Výzkum se zaměřuje na identifikaci vhodných typů konstrukcí pro aplikaci metody zesilování pomocí nabetonávky z UHPFRC. Různé typy mostů, budov a dalších betonových konstrukcí jsou zkoumány z hlediska jejich reakce na zesílení a optimální tloušťky nabetonávky. Tyto analýzy zahrnují posouzení mechanických vlastností, deformačního chování a dlouhodobé trvanlivosti.

5.3. Propojení mezi novou vrstvou UHPFRC a stávající konstrukcí

Důležitým aspektem výzkumu je studium propojení mezi novou vrstvou UHPFRC a stávající betonovou konstrukcí. Zajištění správného spojení mezi oběma vrstvami je klíčové pro dosažení optimálního přenosu sil a zajištění dlouhodobé stability. Experimentální testy a numerické simulace budou prováděny k posouzení pevnosti spojení, adheze a odolnosti vůči prostředí.

5.4. Výzkumné trendy

Aktuální výzkum v oblasti zesilování konstrukcí pomocí nabetonávky z UHPFRC se zaměřuje na další optimalizaci metod a postupů aplikace, včetně vývoje nových adhezivních systémů, technologií aplikace a monitorování dlouhodobého chování zesílených konstrukcí.

6. ZÁVĚR

Výzkum zesilování betonových konstrukcí pomocí nabetonávky z UHPFRC nabízí inovativní přístup k prodloužení životnosti a zvýšení únosnosti těchto konstrukcí. Optimalizace tloušťky nabetonávky a správné propojení mezi vrstvami jsou klíčové pro úspěch této metody. Aktuální výzkum se zaměřuje na další optimalizaci metod a technologií aplikace, včetně vývoje nových adhezivních systémů. Zesilování konstrukcí pomocí UHPFRC představuje efektivní a udržitelný způsob pro zajištění dlouhodobé stability a bezpečnosti betonových struktur.

PODĚKOVÁNÍ

Příspěvek vznikl za finanční podpory ČVUT v Praze v rámci projektu SGS24/040/OHK1/1T/11.

Reference

- [1] BRÜHWILER, Eugen. UHPFRC technology to enhance the performance of existing concrete bridges. *Structure and Infrastructure Engineering*. 2020, vol. 16, no. 1, s. 94-105. ISSN 1573-2479.
- [2] BRÜHWILER, Eugen, Malena BASTIEN-MASSE, Hartmut MÜHLBERG, et al. Strengthening the Chillon viaducts deck slabs with reinforced UHPFRC. In: *IABSE Conference, Geneva 2015: Structural Engineering: Providing Solutions to Global Challenges* [online]. Zurich, Switzerland: International Association for

- Bridge and Structural Engineering (IABSE). 2015, s. 1171-1178. ISBN 978-3-85748-140-6.
- [3] CHAMPENOY, Damien et al. Illzach Bridge: Innovative Repair of Orthotropic Deck Using Ultra-High-Performance Fibre-Reinforced Concrete-Return After 5 Years. *Structural Engineering International: Journal of the International Association for Bridge and Structural Engineering (IABSE)*. 2020, vol. 30, no. 3, s. 387-392. ISSN 1016-8664.
- [4] HABER, Zachary B. et al. Bond characterization of UHPC overlays for concrete bridge decks: Laboratory and field testing. *Construction & Building Materials*. 2018, vol. 190, s. 1056-1068. ISSN 0950-0618.
- [5] BRÜHWILER, Eugen. Rehabilitation of bridges using Ultra-High Performance Fiber Reinforced Concrete. *Safety and Reliability of Bridge Structures*. 2009, s. 185-194.
- [6] BRÜHWILER, Eugen a DENARIÉ, Emmanuel. Rehabilitation and Strengthening of Concrete Structures Using Ultra-High Performance Fibre Reinforced Concrete. *Structural Engineering International: Journal of the International Association for Bridge and Structural Engineering (IABSE)*. 2013, vol. 23, no. 4, s. 450-457. ISSN 1016-8664.
- [7] DENARIÉ, Emmanuel a BRÜHWILER, Eugen. Structural Rehabilitations with Ultra-High Performance Fibre Reinforced Concretes (UHPFRC). *Restoration of buildings and monuments : an international journal*. 2006, vol. 12, no. 5, s. 93-108.
- [8] BRÜHWILER, Eugen, DENARIÉ, Emmanuel a HABEL, Katrin. Ultra-high performance fibre reinforced concrete for advanced rehabilitation of bridges. In: *Proceedings, fib-Symposium, Budapest*. 2005, s. 951-956.
- [9] GRAYBEAL, Benjamin, et al. International Perspective on UHPC in Bridge Engineering. *Journal of Bridge Engineering*, 2020, 25.11: 04020094.
- [10] DENARIÉ, Emmanuel. SAMARIS D22-Full scale application of UHPFRC for the rehabilitation of bridges—from the lab to the field. *SAMARIS*, 2005.
- [11] BRÜHWILER, Eugen; SHEN, Xiujiang. Strengthening of existing structures using R-UHPFRC: principles and conceptual design. In: *The 2nd ACF Symposium 2017—Innovations for Sustainable Concrete Infrastructures*. 2017.
- [12] GRAYBEAL, Benjamin A., et al. *Bond of field-cast grouts to precast concrete elements*. United States. Federal Highway Administration, 2017.
- [13] KALNÝ, Milan; KOMANEC, Jan; KVASNIČKA, Václav. Metodika pro navrhování prvků z UHPC. Praha, 2015.
- [14] COUFAL Robert, VÍTEK Jan L., PROCHÁZKOVÁ Alena. Praktická zkušenost s výrobou a dopravou uhpc. In: *TBG Metrostav [online]*. 2015, č. 2, str. 28
- [15] FEHLING, Ekkehard; LEUTBECHER, Torsten; BUNJE, Kai. Design relevant properties of hardened ultra high performance concrete. In: *Int. Symp. on Ultra High Performance Concrete*. 2004. p. 327-338.
- [17] SGS24/040/OHK1/1T/11: Moderní cementové kompozity a jejich efektivní použití v konstrukcích