

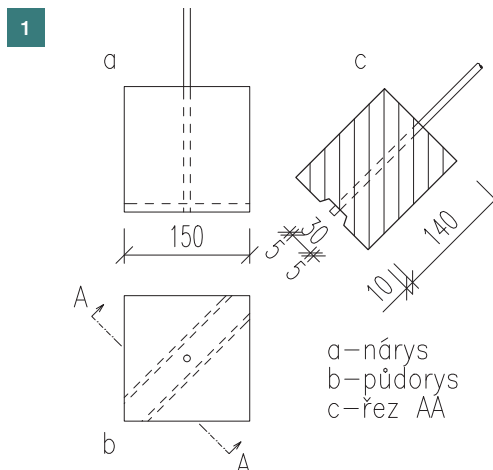
# TEPLOTNÍ NAMÁHÁNÍ UHPC – VLIV NA SOUDRŽNOST PŘEDPÍNAČÍ VÝZTUŽE ■ THERMAL STRESS OF UHPC – DETERMINATION ON THE BOND OF PRESTRESSING REINFORCEMENT

David Čítek, Jiří Kolísko, Petr Pokorný

Prefabrikace prvků z UHPC v posledních letech ve světě, ale i v ČR vzrůstá. Subtilní konstrukce z tohoto moderního materiálu vyžadují experimentální program pro stanovení chování prvku a vytvoření podkladů pro optimální návrh konstrukce. Předchozí výzkum soudržnosti UHPC s různým typem výztuže poukázal na jeho velmi dobré vlastnosti a možnost velmi výrazného snížení kotevnicích délek a následně i rozměru konstrukčního detailu. Aktuální příspěvek se věnuje určení vlivu teplotního namáhání na soudržnost předpínací výztuže a UHPC. Zkušební vzorky byly podrobeny cyklování teplo/mráz a byly také vystaveny účinkům vysokých teplot. Příspěvek v krátkosti shrnuje a popisuje rozdíly mezi běžným betonem a UHPC a především poskytuje výsledky dosavadního experimentálního výzkumu a staví základy pro výzkum navazující.

■ Prefabrication of UHPC elements in the last years increases in the world but also in the Czech Republic. Subtle structures made of this modern material require an experimental program to determine the behaviour of the element and create the basis for optimal design of the structure. Previous research on the bond of UHPC and various types of reinforcement has shown its very good properties and the possibility of a very significant reduction in anchorage lengths and consequently the dimension of the construction details. The current contribution is devoted to the determination of the influence of thermal stress on the bond of prestressing reinforcement and UHPC. The samples were subjected to both freeze/thaw cycling and also exposed to high temperatures. The paper briefly summarizes and describes the differences between conventional concrete and UHPC and provides experimental results and bases for ongoing experimental reinforcement.

Výzkum v oblasti použití UHPC je velmi zásadní. Tento relativně nový druh materiálu s vynikajícími vlastnostmi umožňuje dle dosavadních zkušeností velmi výrazně optimalizovat návrh detailů konstrukce zejména s ohledem na kotevní délku výztuže. V předchozích experimentech zaměřených na soudržnost betonářské a předpínací výztuže s UHPC byl ověřen fakt, že vynikající vlastnosti materiálu UHPC na ni mají velmi významný vliv. V návaznosti na tento výzkum článek obecně popisuje experimentální ověření smykových napětí mezi předpínací výztuží a UHPC. Experimentální program je zaměřen na detailnější popis vlivu vysoké teploty a teplotního namáhání



(mráz/voda) zkušební vzorků se zabetonovanou výztuží na výsledné hodnoty napětí v soudržnosti. Degradace materiálů a s ní spojený pokles materiálových vlastností může mít na hodnoty smykového napětí velmi zásadní dopad.

## ZKOUŠENÍ SOUDRŽNOSTI PŘEDPÍNAČÍ VÝZTUŽE

Soudržnost je u železobetonových a předpjatých konstrukcí jedním z důležitých faktorů. Tahová síla z výztuže je do betonu přenášena pomocí nerovnoměrného smykového napětí na kontaktu výztuže a betonu. Vzhledem k nerovnoměrnému průběhu napětí je nutné přijmout normou popsané zjednodušení a tuto sílu přepočítat na celou kotevní délku. Stanovením soudržnosti předpínací výztuže s betonem se zabývá norma ČSN 73 1333 – Zkoušení soudržnosti předpínací výztuže s betonem. Ta jako zkušební vzorky předepisuje krychle o hraně 150 mm s osově zabetonovanou výztuží, jejíž kotevní délka činí 140 mm (obr. 1 a 2).

Pro experimentální účely umožňuje norma použít libovolnou třídu betonu a předepisuje pouze přípravu zkušebních vzorků dle schématu na obr. 1. V případě provedených experimentů bylo k přípravě zkušebních těles využito betonu C50/60 a UHPC, resp. UHPFRC (vyztužení rozptýlenou ocelovou výztuží ve formě drátků).

## VLIV CYKLOVÁNÍ MRÁZ/VODA NA SMYKOVÁ NAPĚTÍ V SOUDRŽNOSTI

Druhou částí experimentů byl detailnější popis chování materiálu vystaveného

teplotnímu namáhání. Teplotní namáhání je zde chápáno ve smyslu cyklování mráz/voda. Vzorky byly vloženy do cyklovacího zařízení, ve kterém byly prováděny cykly mráz (-20 °C) s trváním 4 h a vodní uložení (+20 °C) s trváním 2 h. Vzorky byly ponechány v zařízení postupně na 100 cyklů, dále 200, 300 a 400 cyklů. Princip experimentu spočíval v uložení poloviny vyrobených vzorků do cyklovacího zařízení a poloviny dle normy do PE fólie. Po ukončení příslušných cyklů byly vzorky nafočeny a odzkoušeny společně s referenční sadou uloženou dle normy. Následně byly naměřené tahové síly přepočítány na průměrné hodnoty smykového napětí v soudržnosti.

## Běžný beton C50/60

Vzorky z běžného betonu C50/60:

- po 100 zmrazovacích cyklech prokazovaly povrchové poškození vlásovými trhlinami a zejména v prvotních posunech horního nezatiženého konce výztuže došlo ke snížení průměrného smykového napětí v soudržnosti až na cca 56 % hodnot referenčních vzorků,
- po 200 zmrazovacích cyklech byl zaznamenán obdobný trend celkového snížení soudržnosti (26 % hodnot referenčních vzorků),
- po 300 zmrazovacích cyklech docházelo k povrchovému odpadávání betonu, zejména na hranách vzorku. Celková soudržnost byla touto celkovou degradací vzorku znatelně ovlivněna – vzorky dosahovaly pouze 13 % referenčních hodnot.

## UHPC

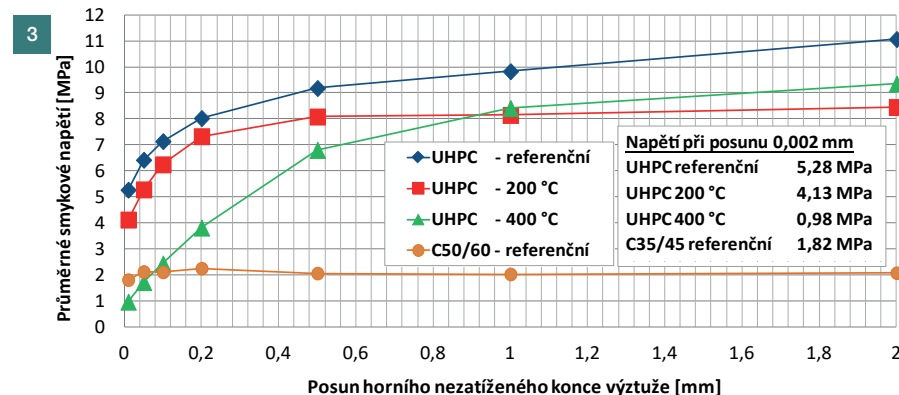
Velmi zajímavý průběh experimentu oproti vzorkům z běžného betonu byl zaznamenán u těles vyrobených z UHPC. Zásadní zjištění spočívá v tom, že ani po 400 cyklech nedochází u vzorků k porušení struktury tělesa, ale ani ke snížení průměrných napětí v soudržnosti. Jemnozrnná struktura UHPC ve spojení s výbornými materiálovými parametry tak dlouhodobě odolává extrémním podmínkám, kterými tyto zmrazovací cykly bezpochyby jsou. Fakt, že vzorky z UHPC po zmrazovacích cyklech dosahují místy vyšších hodnot než vzorky referenční se dá vysvětlit způsobem ošetřování vzorků. Normové uložení předpokládá uložení referenčních vzorků ve vlhkosti 60 %, tzn. v PE fólii. Cyklováním se ale vzorky opakovaně dostávají do vody a může tak docházet k dodatečné hydrataci cementu, a tím i ke zlepšení mechanických vlastností.

## Dílní výsledky

Krychelné pevnosti v tlaku referenčních vzorků z UHPC se pohybovaly v rozmezí 120 až 140 MPa a pevnosti betonu třídy C50/60 v rozsahu 60 až 70 MPa. Dílním výsledkem experimentu bylo porovnání chování dvou rozdílných materiálů

## Literatura:

- [1] ČÍTEK, D., HUŇKA, P., ŘEHÁČEK, S., KOLÍSKO, J. Investigation of Bond Behaviour of UHPC. *Applied Mechanics and Materials*. 2014, Vol 617, pp. 225–228. Trans Tech Publications, Switzerland, 2014.
- [2] ČÍTEK, D., KOLÍSKO, J., VÍTEK, J. L., HUŇKA, P. Vliv kotevní délky na soudržnost předpínací výztuže a UHPC. In: *Sborník 12. konference Technologie betonu, Jihlava*. ČBS, 2014. ISBN 978-80-903806-4-6
- [3] PHAN, L. T. *High-Strength concrete at high temperature – an overview* [online]. Dostupné z: [fire.nist.gov/bfrlpubs/build02/PDF/b02171.pdf](http://fire.nist.gov/bfrlpubs/build02/PDF/b02171.pdf)
- [4] ABRAMS, M. S. Compressive strength of concrete at temperatures to 1600 °F. *ACI Special Publication*. Vol. 25. Temperature and concrete, Detroit, Michigan, 1971.
- [5] Recommendation of RILEM TC 200-HTC: Mechanical concrete properties at high temperatures – modelling and applications, Part 1: Introduction – General presentation. *Materials and Structures*. 2007, Vol. 40, Issue 5, pp. 449–458. DOI 10.1617/s11527-007-9285-2
- [6] SCHNEIDER, U., SCHWESINGER, P. (eds) *Mechanical testing of concrete at high temperatures*. RILEM Transaction 1. February 1990, p. 72. ISBN 3-88122-565-X
- [7] SCHNEIDER, U. *Properties of materials at high temperatures – Concretes*. RILEM-Report 44-PHT. 2nd Ed. Kassel, June 1986.



v extrémních podmínkách. Rozdíl mezi UHPC a betonem C50/60 v soudržnosti je zřejmý. Referenční vzorky z běžného betonu dosahují výrazně menších hodnot průměrných smykových napětí, což již bylo prokázáno předchozím výzkumem.

## VLIV ZVÝŠENÉ TEPLoty NA SMYKOVÁ NAPĚTÍ V SOUDRŽNOSTI

Významné namáhání materiálu může být způsobeno vystavením vzorků vysokým teplotám. Obdobné vzorky jako pro případ cyklování byly v jedné části výzkumného programu vystaveny zvýšené teplotě 200, 400 a 600 °C. Vzorky byly zahřívány společně se vzorky pro materiálové zkoušky. Cílem experimentu bylo vyzkoušet nejvyšší teplotu, které vzorky odolají, a stanovit následné napětí ve smyku. V předchozích experimentech prováděných v Kloknerově ústavu v Praze byly testovány relativně malé vzorky, u kterých nenastával problém se „spallingem“ (odlupováním či rozpadem vzorku). Problémem u těchto experimentů je aktuální vlhkost vzorků a rychlost teplotního zatěžování. V případě našich experimentů nebyly vzorky před teplotním zatěžováním sušeny (byly uloženy na vzduchu v laboratorním prostředí). Během zahřívání vzorků s vloženou výztuží došlo k jejich rozpadu při teplotě 500 až 600 °C, což odpovídá předchozím výsledkům experimentů. Z tohoto důvodu jsou zobrazeny hodnoty průměrného napětí v soudržnosti pouze do teploty 400 °C. Konečné hodnoty (jak soudržnosti, tak materiálové) jsou uvedeny v grafu na obr. 3.

## ZÁVĚR

Příspěvek ve zkratce popisuje chování UHPC vystaveného extrémnímu zatížení. V první části experimentu byly vzorky vystaveny extrémnímu teplotnímu namáhání cyklováním mezi mrazem (-20 °C) a vodou (+20 °C). Tělesa z UHPC a také z běžného betonu C50/60 byla vystavena až 400 cyklům. U vzorků z běžného

1 Schéma zkušební vzorku 2 Zkušební vzorek při zkoušce 3 Graf průměrných smykových napětí v soudržnosti

1 Scheme of the specimen 2 Specimen during the test 3 Diagram of average shear stress in bond

betonu docházelo k výrazné degradaci struktury betonu a hodnoty smykového napětí v soudržnosti měly klesající charakter. Naproti tomu u vzorků z UHPC nebyla zaznamenána žádná degradace materiálu a ve všech případech i po 400 cyklech byly naměřeny hodnoty smykového napětí stejné nebo vyšší než u referenčních vzorků. Zároveň jsou z grafu patrně znatelně vyšší hodnoty v soudržnosti UHPC oproti soudržnosti běžného betonu C50/60.

U vzorků po teplotním namáhání je patrný pokles smykového napětí v soudržnosti po vystavení teplotě 400 °C. Výsledné napětí se se vzrůstajícím pokluzem výztuže zvyšuje a je dáno šroubovitým zapletením předpínacích lan. U lan dochází k rotaci a změně namáhání. Pro vyhodnocení jsou v tomto případě důležité úvodní posuny. Z hlediska vyhodnocení výsledky korelují s výsledky materiálových pevností materiálu vystaveného vysokým teplotám. Jejich výraznější pokles je patrný právě po vystavení 400 °C.

Podrobnější analýzy budou součástí dalších příspěvků.

V článku byly popsány výsledky výzkumného projektu GAČR 17-22796S. Zkoušky byly provedeny v laboratořích Kloknerova ústavu ČVUT v Praze.

Ing. David Čítek  
david.citek@cvut.cz



doc. Ing. Jiří Kolísko, Ph.D.  
jiri.kolisko@cvut.cz



Ing. Petr Pokorný, Ph.D.  
petr.pokorny@cvut.cz



všichni: Kloknerův ústav ČVUT v Praze