

VYUŽITÍ STATICKÉHO MODELOVÁNÍ V PROGRAMU ATENA K ANALÝZE SOUDRŽNOSTI VÝZTUŽE S UHPC VYSTAVENÝM VYSOKÝM TEPLOTÁM

USE OF STATIC MODELING IN THE ATENA PROGRAM FOR ANALYSIS OF BOND OF REINFORCEMENT WITH UHPC EXPOSED TO HIGH TEMPERATURES

Jindřich Čech, David Čítek, Petr Pokorný, Jiří Kolisko

Článek se zabývá numerickou analýzou soudržnosti ocelového (předpínacího) lana s UHPC, jenž byl ohřát na vyšší teploty a následně ochlazen. Při numerické analýze byly porovnány materiálové vlastnosti UHPC experimentálně zjištěné za referenční teploty 20 °C, po ohřátí na teploty 200, 400 a 600 °C a po následném vytemperování na běžnou teplotu. Výsledné průběhy posunu výztuže vůči betonu závislého na tahové síle zjištěné při numerické analýze byly porovnány s experimentálními výsledky. Výsledky slouží k nakonfigurování modelu cementového kompozitu pro náročnější simulace konstrukcí a zatěžovacích stavů.

This article deals with the numerical analysis of the bond of a steel bar (prestressing strand) with UHPC heated to higher temperatures and subsequently cooled. Numerical analysis was performed with experimentally determined material properties of UHPC at a reference temperature of 20 °C and further after heating to temperatures of 200, 400 and 600 °C and subsequent annealing to normal temperature. The resulting deflection depending on the pulling force from the numerical analysis were compared with the experimental results. The results are used to configure the cement composite model for more demanding simulations of structures and load cases.

Teplota prostředí je důležitým faktorem, jenž ovlivňuje chování stavebních konstrukcí, a neméně důležité je její působení na pevnost ultra vysokohodnotného betonu (UHPC) a jeho soudržnost s ocelovou výztuží. Teplota prostředí a její účinky na konstrukce by proto měly být zohledňovány při návrhu železobetonových konstrukcí vystavených právě působení vysokých teplot nejen z důvodu možného budoucího kolapsu konstrukce, ale také z důvodu zamezení vzniku nevratných poškození či poruch.

Použití UHPC pro různorodé druhy konstrukcí je ve stavebnictví stále častější. Praktický význam těchto cementových kompozitů je založen na jejich vysokých pevnostech, lomových parametrech, odolnosti proti nárazu a na trvanlivosti. Příznivé parametry materiálu jako nízká permeabilita, nasákavost a celkově velmi vysoká homogenita jemnozrné

směsi však mohou v některých situacích představovat vážné riziko. U betonových konstrukcí je toto riziko způsobeno vystavením konstrukce účinkům zvýšených teplot např. při požáru. Při působení vysokých teplot dochází v betonu k extrémnímu namáhání, které zejména u přirozeně vlhkého betonu vede až k explozivnímu odprýskávání a poškození povrchových vrstev.

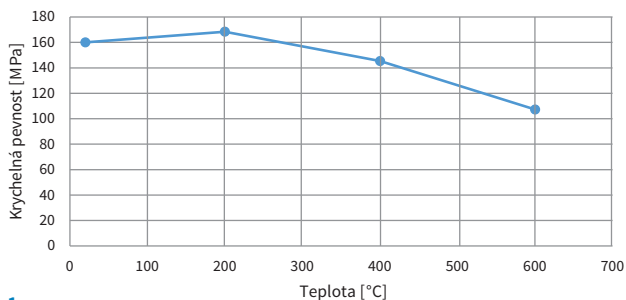
Prvním z vlivů způsobujících destrukční projevy je teplotně-mechanický proces, při kterém je teplo přenášeno mezi jednotlivými komponenty matrice. Vzhledem k rozdílným teplotním roztažnostem pojivové složky a kameniva dochází k nerovnoměrné deformaci částí a k lokálnímu působení tahových sil v betonu. Tyto síly mohou mít za následek popraskání betonu.

Dalším významnějším vlivem na poškození betonu vystaveného

vysokým teplotám je teplotně-vlhkostní proces, při kterém dochází k přeměně vázané vody v betonu na páru. Struktura matrice UHPC vzhledem ke své nízké pórovitosti neposkytuje dostatek prostoru pro expanzi vodních par a extrémní tlak těchto vodních par tak má za následek zvýšení tahových napětí, odprýskávání a poškození materiálu.

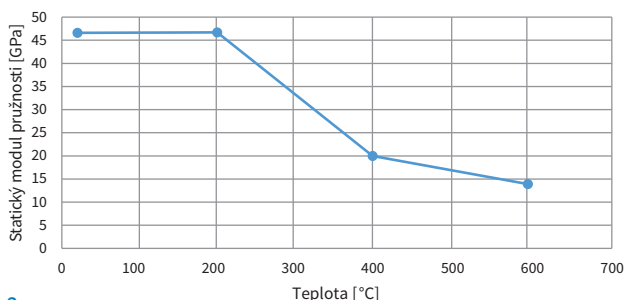
Redukci trhlin a zlepšení materiálových parametrů lze však docílit přidáním vhodného množství rozptýlené výztuže (ocel, sklo, kompozit). Aplikace různých druhů rozptýlené výztuže do betonu je v dnešní době již běžnou záležitostí, díky které lze docílit snížení smrštění a eliminaci případných trhlin. Přidáním rozptýlené výztuže do matrice vysokohodnotných betonů také získáváme významně lepší materiálové parametry, duktilitu a zpevnění materiálu po vzniku první trhliny. Nejčastěji používanou

Závislost krychelné pevnosti na teplotě

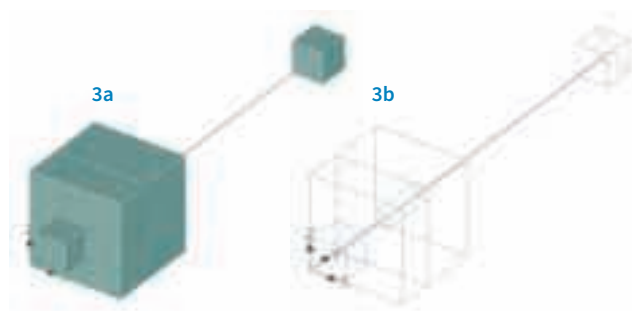


1

Závislost statického modulu pružnosti na teplotě



2



1 Průběh krychelné pevnosti UHPC v závislosti na teplotě 2 Průběh statického modulu pružnosti v závislosti na teplotě 3 Numerický model testu soudržnosti: a) plný model se sítí konečných prvků, b) drátový model 4 Boční pohled na plný model s podporami

1 Cubic strength of UHPC depending on temperature 2 Static modulus of elasticity of UHPC depending on temperature 3 Numerical model of bond test: a) full model with finite element network, b) wireframe model 4 Side view of a full model with supports



4

rozptýlenou výztuží v UHPC jsou ocelová vlákna o délce cca 6 až 12 mm. V této fázi experimentu byla použita směs UHPC se zastoupením 1,5 % objemu ocelových vláken délky 12 mm.

Tento článek je doplněním předchozího experimentu popsaného v [1] – nově navíc zhodnocuje výsledky numerického statického modelování výtahovací zkoušky na zkušební křivkách v programu Atena a porovnává je s výsledky experimentálních zkoušek. V modelech jsou zahrnuty změny vlastností zkušební křivky z UHPC vlivem ohřátí na vysoké teploty a následného ochlazení, které byly zjištěny experimentálně.

Experimentální část

Jako vstupní parametry pro numerické modelování byly experimentálně zjiš-

těny krychelná pevnost a modul pružnosti za referenční teploty (cca 20 °C) a dále při zvýšených teplotách 200, 400 a 600 °C. Teplota byla vyvozována automaticky v elektrické peci s rychlostí zatěžování 1 °C/min (obr. 1 a 2). Na dané teplotě byla pec temperována po dobu 1 h. Chladnutí pece nebylo řízeno. Vychladlé vzorky byly dále zkoušeny kvůli stanovení jednotlivých materiálových parametrů. Pomocí zjištěné krychelné pevnosti za dané teploty byly pak pomocí programu Atena vygenerovány další materiálové vlastnosti potřebné pro numerickou analýzu (válcová pevnost v tlaku, pevnost v tahu). Moduly pružnosti vygenerované programem Atena byly následně upraveny na základě experimentálního měření modulu pružnosti na skutečných vzorcích za vyšších teplot.

Numerické modelování

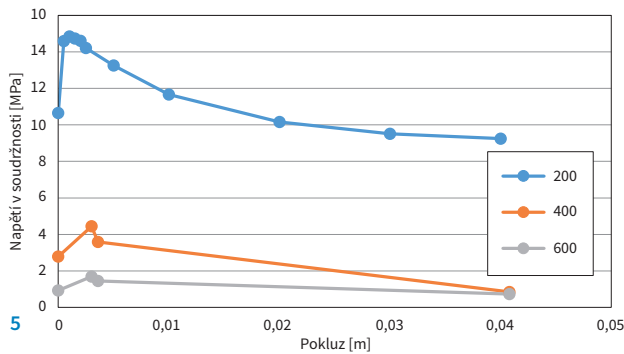
Numerický model uspořádání zkoušky soudržnosti na vytažení byl vytvořen a počítán v softwaru Atena 3D Engineering (obr. 3 a 4). Zkušební křivky z UHPC byla modelována jako dva standardní makroprvky – jeden o délce hrany 60 mm, v němž byla výztuž zakotvena, a druhý o délce hrany 90 mm s otvorem pro výztuž pro simulaci separace ocelového prutu (předpínacího lana). Zabetonované ocelové lano bylo modelováno jako prvek s označením Prutová výztuž s parametry shodnými se zkouškou v laboratoři. Mimo tyto prvky byly vymodelovány ještě pomocné makroprvky, a to křivčičky na volných koncích ocelového prutu. Na tyto pomocné makroprvky bylo aplikováno zatížení posunem

Již od roku 1992

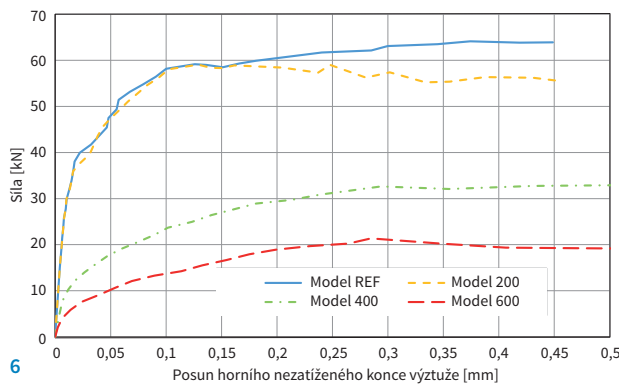


KOBIT
JIČÍN
CZECH REPUBLIC

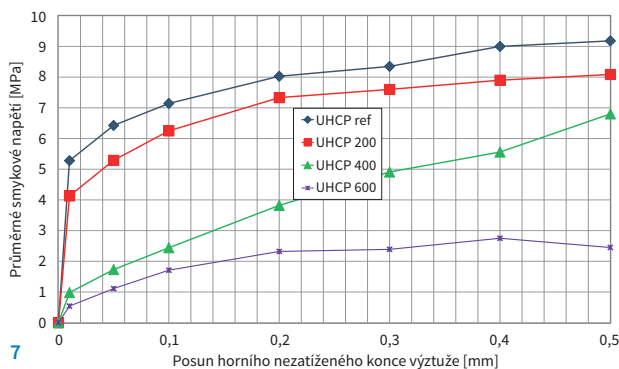
KOBIT, spol. s r. o.
Konecchlumského 1100, Jičín
www.kobit.cz



5 Porovnání modelů soudržnosti UHPC s ocelí generovaných programem Atena na základě krychelné pevnosti



6 Experimentální výsledky závislosti průměrného smykového napětí na pokluzu



7 Průběhy testů vytahování při určitých teplotách UHPC z numerické analýzy

8 Porovnání výsledků numerického modelu a experimentu: a) pro vzorek ohřátý na 200 °C, b) pro vzorek ohřátý na 400 °C, c) pro vzorek ohřátý na 600 °C

8 Comparison of numerical model and experiment results: a) for a reference sample, b) for a sample exposed to 200 °C, c) for a sample exposed to 400 °C, d) for a sample exposed to 600 °C

a) monitor ke sledování posunu a působící síly, poněvadž program Atena neumožňuje aplikovat monitory a zatížení do koncového bodu položky Prutová výztuž.

Jako materiál zkušební krychle byl z knihovny programu Atena vybrán materiálový model 3D Nonlinear Cementitious 2. S jeho pomocí byly vygenerovány materiálové vlastnosti na základě experimentálně zjištěné krychelné pevnosti UHPC po ohřevu na příslušnou teplotu a ochlazení. Experimentálně zjištěné moduly pružnosti UHPC byly do vygenerovaných materiálových modelů dodatečně doplněny.

Jako materiál výztužného prutu byla zvolena položka s názvem Výztuž se středními hodnotami bilineárního pracovního diagramu v tahu. Soudržnost výztužného ocelového prutu byla modelována materiálovou položkou s názvem Soudržnost výztuže, jejíž parametry byly vygenerovány programem na základě profilu prutu, experimentálně zjištěné krychelné pevnosti UHPC v tlaku a odborně odhadnuté kvality soudržnosti (program nabízí možnosti: výborná, dobrá nebo špatná). Pomocné krychličky byly modelovány z materiálu Bilinear Steel von Mises.

Jako zatížení byl aplikován posun na jednom volném konci výztužného prutu (na pomocný makroprvek), a to v hodnotě 0,1 mm v každém kroku. Současně byl osazeným monitorem na opačném konci měřen posun tohoto konce výztužného prutu (podobně jako v experimentu). Dalším osazeným monitorem byla dpočítávána síla, která působící posun vyvolává, a tak byl vytvářen L-D diagram pro srovnání chování krychle vystavených extrémním teplotám a krychle za referenční teploty.

Jednotlivé makroprvky byly nasítovány lineárními „tetrahedra“ konečnými prvky o velikosti hrany 10 mm.

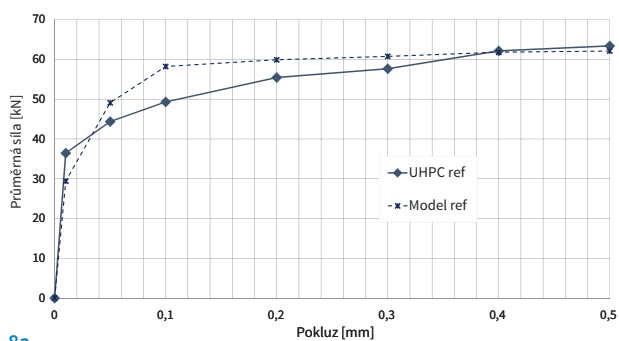
Výsledky

Pro jednotlivá teplotní namáhání byla provedena řada výpočtů, které byly kalibrovány z hlediska materiálových vlastností a okrajových podmínek. Pro jednotlivé teploty jsou zde prezentovány grafy závislosti síly na pokluzu. Z numerické analýzy vyplývá, že při ohřátí UHPC na teplotu do 200 °C nedojde v soudržnosti s ocelovou výztuží téměř k žádné změně. Výrazné změny v soudržnosti UHPC s výztužnou ocelí se projeví při ohřátí betonu na 400 a 600 °C, kdy se sníží jak krychelná pevnost v tlaku, tak statický modul pružnosti. Tyto skutečnosti se výrazně projeví na průběhu vytahovacího testu. Výsledné průběhy testů vytahování ocelového prutu ze zkušební krychle z UHPC při referenční teplotě (cca 20 °C) a při teplotách 200, 400 a 600 °C jsou znázorněny v grafu na obr. 7. Porovnání výsledků numerických modelů a výsledků experimentálního měření znázorňují grafy na obr. 8.

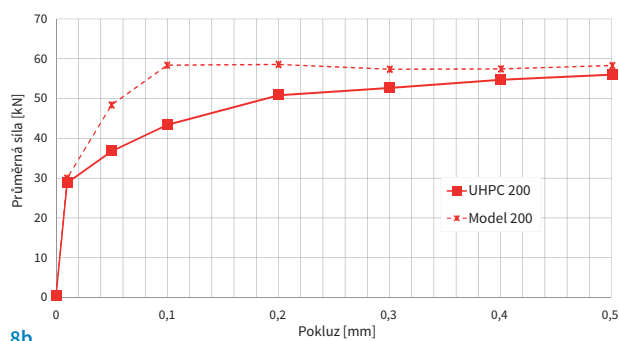
Závěr

Z numerické analýzy testu vytahování ocelového prutu z krychle z UHPC vyplývá, že soudržnost UHPC s ocelovým prutem je téměř totožná při referenční teplotě 20 °C a při zvýšené teplotě do 200 °C. Teprve při ohřátí na 400 a 600 °C se model soudržnosti změkčuje v závislosti na zvyšující se teplotě. Snížení soudržnosti koreluje se snížením materiálových parametrů matrice UHPC.

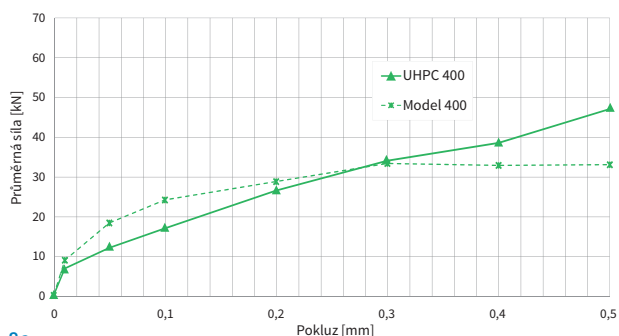
Z porovnání výsledků numerické analýzy a výsledků experimentu je zřejmá shoda numerického modelování a experimentálního chování všech vzorků ohřátých na příslušné teploty. Na základě numerických modelů soudržnosti UHPC s ocelí použitých v numerické analýze lze říci, že po vystavení UHPC teplotě do 200 °C se materiálové vlastnosti a soudržnost UHPC s ocelí prakticky nezmění. Snížení hodnot materiálových vlastností a únosnosti v soudržnosti UHPC s ocelí se projeví až při ohřátí UHPC na teploty cca 400 °C, 600 °C a vyšší.



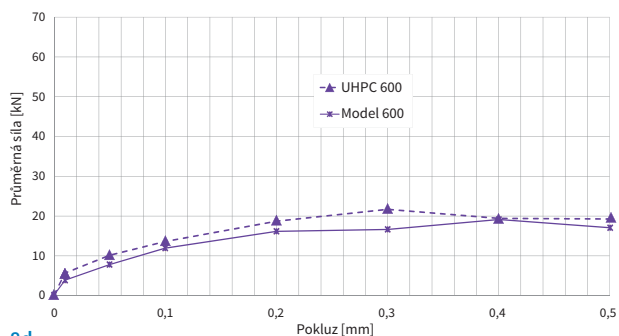
8a



8b



8c



8d

Zatímco při zahřátí UHPC na teplotu 400 °C a následném ochlazení se krychelná pevnost sníží o cca 10 % hodnot ve srovnání s pevností krychlí při referenční teplotě a teplotě 200 °C, modul pružnosti se sníží o více než 50 %. Vzorek UHPC zahřátý na 600 °C a následně ochlazený vykázal pokles krychelné pevnosti 30 až 35 %, ale pokles hodnoty modulu pružnosti až cca 70 %. Poklesy hodnot soudržnosti UHPC s ocelí vykazují podobnost spíše s moduly pružnosti, kdy mezi hodnotami soudržnosti pro teplotu

200 °C a teplotu 400 °C je pokles až 90 %. Pro teplotu 600 °C je pak pokles hodnot soudržnosti 90 až 95 %. Největší pokles smykového napětí v soudržnosti tedy nastane mezi teplotami 200 °C a 400 °C, při teplotě vyšší než 400 °C je další pokles hodnot v závislosti na zvyšující se teplotě již mírnější.

Lze tedy konstatovat, že chování UHPC v soudržnosti s ocelí za běžných teplot lze pro analýzu konstrukce uvažovat až do zahřátí či vystavení konstrukce teplotám do 200°C. Pro konstrukce z UHPC

vyztuženého předpínací výztuží vystavené teplotám vyšším než 200 °C se musí pokles hodnot soudržnosti zahrnout do statického návrhu či tato skutečnost řešit dalšími opatřeními.

Tyto dílčí výsledky jsou podkladem pro náročnější simulace konstrukčních prvků a konstrukcí namáhaných zvýšenou teplotou, u kterých je experimentální zkouška komplikovaná či nemožná.

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

Literatura:

- [1] ČÍTEK, D., KOLÍSKO, J., POKORNÝ, P. Teplotní namáhání UHPC – vliv na soudržnost předpínací výztuže. *Beton TKS*. 2019, roč. 19, č. 6, s. 60–61. ISSN 1213-3116.
- [2] POKORNÝ, P. Vliv koroze zinkované oceli na soudržnost s betonem. *Koroze a ochrana materiálu*. 2012, 56(4), s. 119–135.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] PHAN, L. T. *High-Strength concrete at high temperature – an overview* [online]. Dostupné z: fire.nist.gov/bfrlpubs/build02/PDF/b02171.pdf
- [6] ABRAMS, M. S. *Compressive Strength of Concrete at Temperatures to 1 600 °F. ACI Special Publication*. Vol. 25. Temperature and Concrete. Detroit, Michigan, 1971.
- [7] 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
- [8] SCHNEIDER, U., SCHWESINGER, P. (eds) *Mechanical testing of concrete at high temperatures*. RILEM Transaction 1. February 1990, p. 72. ISBN 3-88122-565-X.
- [9] SCHNEIDER, U. *Properties of materials at high temperatures – Concretes*. RILEM-Report 44-PHT. 2nd ed. Kassel, June 1986.



Ing. Jindřich Čech, Ph.D.
jindrich.cech@cvut.cz



Ing. David Čítek
david.citek@cvut.cz



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



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

všichni: Kloknerův ústav ČVUT v Praze