

VYHODNOCENÍ MĚŘENÍ VLIVU OŠETŘOVÁNÍ TEPLOTOU NA TLAKOVOU PEVNOST, SMRŠŤOVÁNÍ A DOTVAROVÁNÍ UHPC

EVALUATION OF TESTS FOR THE EFFECT OF WARM CURING ON COMPRESSION STRENGTH, SHRINKAGE AND CREEP OF UHPC

Vladimír Příbramský

V příspěvku je uveden popis a vyhodnocení experimentálního ověření reologických vlastností patentované směsi ultra vysokohodnotného betonu (UHPC) ošetřovaného ve vodním prostředí při různých teplotách. Pro vyhodnocení je použit modifikovaný model B4, který je v současnosti považován za nejpokročilejší materiálový model pro predikci efektů smršťování a dotvarování a který je založen na velmi dobré shodě s velkým množstvím jak experimentálních měření, tak i měření na realizovaných konstrukcích. Z hlediska použití pro predikci chování UHPC se jeví model B4 jako nanejvýš vhodný, neboť popisuje dlouhodobé chování betonu na základě množství použitých příměsí a uvažuje také s možností zahřívání čerstvého betonu pro urychlení hydratace v průběhu ošetřování. Současný model B4 má řadu limitujících podmínek, které UHPC svými vlastnostmi často výrazně překračuje. V tomto článku jsou tyto limity modelu B4 identifikovány a je představena adaptace modelu B4 pro použití na směsi UHPC.

The paper presents a description and evaluation of results of an experimental verification of rheological properties of a patented mixture of ultra-high-performance concrete (UHPC). The specimens were cured in various regimes including temperature and in a water saturated environment. An adapted model B4 was used for the evaluation of the results. Model B4 is currently the most advanced rheological model for prediction of creep and shrinkage. It is based on a great compatibility with a large set of experimental results and measurements obtained from real structures and bridges. It also appears to be viable for use to predict creep and shrinkage UHPC, as it predicts long-term strains by incorporating the effect of the volume of additives and admixtures used in the fresh concrete. Model B4 also takes into account the thermal treatment of fresh concrete, which accelerates hydration of cement in its early age. Current model B4 contains several limiting assumptions, which are often exceeded by characteristics of a UHPC. In this paper, these limits are identified and a viable adaptation of model B4 is presented.

Reologické vlastnosti UHPC

Stejně jako u dotvarování a smršťování betonů běžných tříd je u UHPC významný vliv ošetřování betonu v raném stáří. Napařování povrchu betonových prvků či jejich umístění do prostředí s relativní vlhkostí blízké 100 % snižuje až 4× celkovou míru zpožděné deformace od dotvarování ve srovnání s prvky vystavenými okolnímu prostředí již několik hodin po betonáži. Novinkou a v současné době hojně zkoumanou a používanou metodou ošetřování prvků z UHPC je heat-treatment neboli umístění prvků do prostředí s teplotou mezi 60 až 90 °C a s vysokou relativní vlhkostí, které je pro prvky z UHPC ideální pro rychlý postup hydratace a s tím spojený zrychlený nárůst pevnosti a přetvoření od autogenního smršťování. Ve studii [1] byl zkoumán vliv ošetřování betonu teplotou v různém stáří a bylo prokázáno, že nezávisle na času aplikace

ošetřování teplotou se nárůst přetvoření od dotvarování zastavil po aplikaci ošetřování. Při teplotním ošetřování skokově vzrostla hodnota přetvoření na konečnou hodnotu a tam již na rozdíl od neošetřeného vzorku dále nenarůstala. Ošetřením se dosáhne dlouhodobé stálosti prvků pod provozním zatížením a pro předpjaté prvky nižších ztrát předpětí v důsledku nižší míry smršťování a dotvarování. Pro produkci předem předpjatých prvků je nezanedbatelný vliv možnosti odbednění a vnese ní předpětí i 24 h po betonáži, což přináší efektivní využití zdrojů.

Ošetřování UHPC zvýšenou teplotou

Ošetřování betonů běžných tříd zvýšenou teplotou je pečlivě kontrolováno a maximální dovolená teplota ošetřování standardně nepřesahuje teplotu 60 °C. Důvodem je často diskutovaný

problém vznikajících druhotných forem ettringitu. Ettringit je minerál vznikající hydratací v časně fázi po betonáži, který je však citlivý na teploty vyšší než 70 °C. I při krátkodobém překročení této teploty (několik hodin) v raném stáří se ettringit rozloží na dílčí minerály, které zůstanou ve struktuře betonu. Při následném (zpožděném) vniku vody do struktury betonu dochází k druhotné krystalizaci ettringitu (DEF – delayed ettringite formation) za vzniku krystalické fáze ettringitu s větším objemem než ettringit původní. Tato vlastnost byla prokázána u hojně publikovaných poruch zejména předem předpjatých železničních pražců z betonu standardních pevností do 50 MPa. Nedávná studie [2] detailně popsala princip těchto objemových změn na železničních pražcích v Indii, kde po 6 až 9 letech po betonáži došlo k masivní degradaci velkého množství pražců, a to i těch, které

nebyly nikdy zatížené dopravou. Hlavním důvodem degradace byla shledána druhotná krystalizace ettringitu (DEF). Na výbrusech vzorků z porušených pražců byla pod mikroskopem patrně viditelná separace kameniva a tmelu, který byl vyplněn právě krytaly ettringitu.

Jelikož ošetřování zvýšenou teplotou je významným prostředkem urychlení zrání UHPC, bylo zkoumáno, zda DEF působí i na ošetřované vzorky z UHPC [3]. Bylo zjištěno, že k rozložení prvotního ettringitu dochází stejně jako v případě betonů běžných tříd, avšak vzhledem k přebytku cementu ve směsi UHPC k následné krystalizaci ettringitu již nedochází. Důvodem je, že voda, která je pro pozvolnou krystalizaci nezbytná a která se do struktury UHPC dostane buď mikrotrhlinami, nebo difúzí, je vázána rychleji reagujícími minerály, než je krystalická fáze ettringitu. V UHPC ettringit zůstává amorfní i při ošetřování extrémními teplotami až 180 °C. V prefabrikaci je teplota nad 100 °C prakticky jen těžko dosažitelná standardními technologiemi (propařování za atmosférického tlaku či umístění vzorků do vodního prostředí) a dá se tedy vyvodit, že problém DEF prefabrikované prvky z UHPC nezasahuje.

Experimentální měření na patentované směsi UHPC

Pro detailní analýzu parametrů, které mají vliv na nárůst pevnosti betonu a jeho reologické vlastnosti, byl ve spolupráci s Kloknerovým ústavem ČVUT v Praze připraven a proveden experiment na čtyřech sadách vzorků ze stejné směsi UHPC. Receptura směsi je patentována Kloknerovým

ústavem a dosahuje charakteristické 28denní pevnosti 140 MPa. Sady vzorků byly ošetřovány různým způsobem a ve vodním prostředí. Ošetřování bylo zahájeno po odbednění vzorků ve stáří 24 h a bylo ukončeno po dalších 24 h. Mechanické vlastnosti byly vyhodnocovány na válcových vzorcích Ø 150 mm (modul pružnosti a tlaková pevnost) a na krychlích o hraně 100 mm (tlaková pevnost). Mechanické vlastnosti byly vyhodnoceny v době po odbednění (ve stáří 1 den), po ukončení ošetřování (2 dny) a po 7 a 28 dnech od betonáže. Ošetřování zvýšenou teplotou bylo prováděno ve vodním prostředí v kádích, kde byla teplota udržována pomocí ponorných ohřivačů spínaných automaticky teplotním čidlem umístěným v kádi (obr. 1).

Z hlediska způsobu ošetřování byly měřeny čtyři sady vzorků:

- neošetřované vzorky umístěné po odbednění na vzduchu při pokojové teplotě. Tyto vzorky jsou dále uváděny pod označením Vzduch 20,
- vzorky ponořené do vodního prostředí o pokojové teplotě po dobu 24 h (Voda 20),
- vzorky ponořené do vodního prostředí o teplotě 70 °C po dobu 24 h (Voda 70),
- vzorky ponořené do vodního prostředí o teplotě 90 °C po dobu 24 h (Voda 90).

Průběh teploty vzorků před a v průběhu ošetřování je patrný z grafu na obr. 2. Při ošetřování sady Voda 70 byla průměrná teplota vzorků 70,6 °C a sady Voda 90 byla 88 °C.

Pro měření smršťování a dotvarování byly v každé sadě tři trámký o rozměrech 70 × 70 × 300 mm. Trámký

byly opatřeny strunovými tenzometry, které umožnily měření hodnot přetvoření již od okamžiku betonáže. Smršťování bylo měřeno na jednom trámký z každé sady. Dotvarování bylo měřeno na dvou trámkách, které byly umístěny společně do standů a ihned po vychladnutí po ošetřování byly zatíženy hydraulickým lisem silou 150 kN, což představuje 37 % průměrné tlakové pevnosti neošetřovaného vzorku naměřené dva dny po betonáži. Ošetřování zvýšenou teplotou ve vodním prostředí výrazně podporuje hydrataci, což je zřejmé z rychlého nárůstu pevnosti vzorků a také z rychlosti náběhu autogenního smršťování, jak bude ukázáno dále.

Predikce smršťování a dotvarování

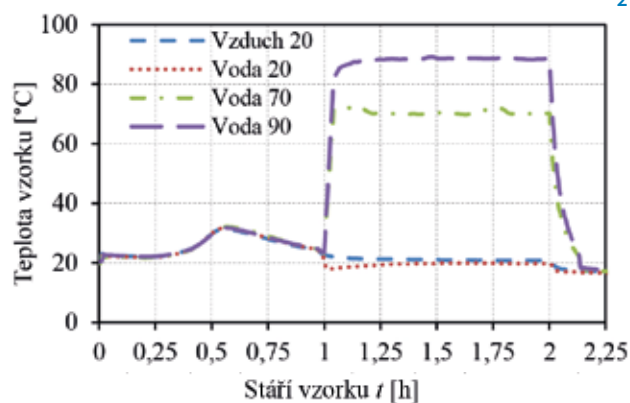
Nejmodernější a nejrozšířenější model pro popis reologického chování betonu je model B4 [4]. Model B4 je formulován na základě velkého množství měření a zkoušek, a to jak provedených v nedávné době, tak i dříve publikovaných. Model popisuje dotvarování a smršťování daleko komplexněji a se zahrnutím více vlivů ve srovnání s jinými modely; např. zohledňuje vliv složení betonové směsi, včetně uvažování efektů příměsí, a třídí betonové prvky do typů podle tvaru.

Pro aplikaci na konstrukce z UHPC je nanejvýš výhodný i parametr zohledňující teplotu při hydrataci. Výhodou modelu je jeho neustálý vývoj na základě nových měření a zkoušek a relativně snadná možnost jeho adaptace pro popis chování betonu ze zkoušek provedených z konkrétního betonu (nebo parametrické studie) pro

1



2





3a



3b

1 Sada vzorků v průběhu ošetřování 2 Průběh teploty vzorků při ošetřování 3 a), b) Měření přetvoření od smršťování a dotvarování na vzorcích po ošetřování teplotou 4 Nárůst tlakové pevnosti vzorků v čase od betonáže

1 A set of test specimens in the curing chamber 2 Temperature of specimens during the curing regime

3 a), b) Measurement of shrinkage and creep strains after the curing and applied heat-treatment

4 Compressive strength of UHPC after different curing regimes

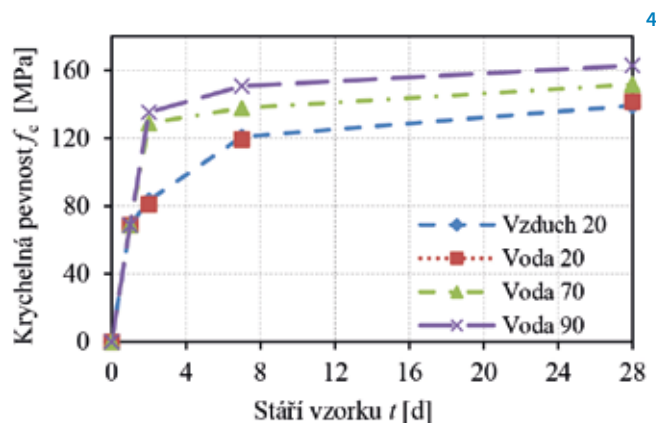
konkrétní projekt. Pro vyhodnocení experimentálních dat byl model adaptován tak, aby jeho rozsah platnosti zahrnoval UHPC. Jednalo se zejména o kalibraci součinitelů příměsí, použití přesnějšího určení modulu pružnosti vysokopevnostních betonů a následně i o úpravu vodního součinitele a poměrů cementu a kameniva na základě předpokladu, že část cementu nehydratuje z důvodu nízkého obsahu vody ve směsi, a má tedy funkci jemnozrného plniva.

Kalibrace modelu B4

Pro predikci přetvoření od smršťování model B4 nabízí několik sad součinitelů příměsí, v případě UHPC se jedná o sadu součinitelů buď při použití superplastifikátoru, nebo křemičitého úletu, ale ne obou složek najednou. UHPC svou recepturou odpovídá

oběma podmínkám, přičemž součinitele samotné se výrazně odlišují. Součinitele pro smršťování jsou uvedeny v tab. 1. Jelikož ani jedna z těchto sad empirických součinitelů neodpovídá naměřeným hodnotám, je nutné jejich hodnoty stanovit z naměřených hodnot.

Různé směsi UHPC vykazují velmi rozdílné rychlosti náběhu autogenního smršťování při ošetřování zvýšenou teplotou. Např. ve studii [5] je náběh pozvolný, ale v jiné studii [1] a při vlastním měření je nárůst přetvoření významný již v průběhu ošetřování. Z tohoto důvodu je obtížné najít univerzální popis chování UHPC různých receptur jedním modelem smršťování. Pro kalibraci naměřených výsledků byla rychlost nárůstu přetvoření od smršťování řízena parametrem r_t , který má na rychlost náběhu přetvoření



Tab. 1 Vliv příměsí na smršťování (zdroj: [4])

Tab. 1 Empirical coefficients for shrinkage prediction (source: [4])

Třída použité příměsi (% z c)	$\times p_2$	$\times p_3$	$\times p_4$	$\times p_5$
superplastifikátor ($\geq 0\%$)	0,72	2,19	1,72	0,48
křemičitý úlet ($\geq 0\%$)	1,12	3,11	0,51	0,61
Použito pro vyhodnocení	2,25	2,30	2,40	0,48

Tab. 2 Vliv příměsí na dotvarování (zdroj: [4])

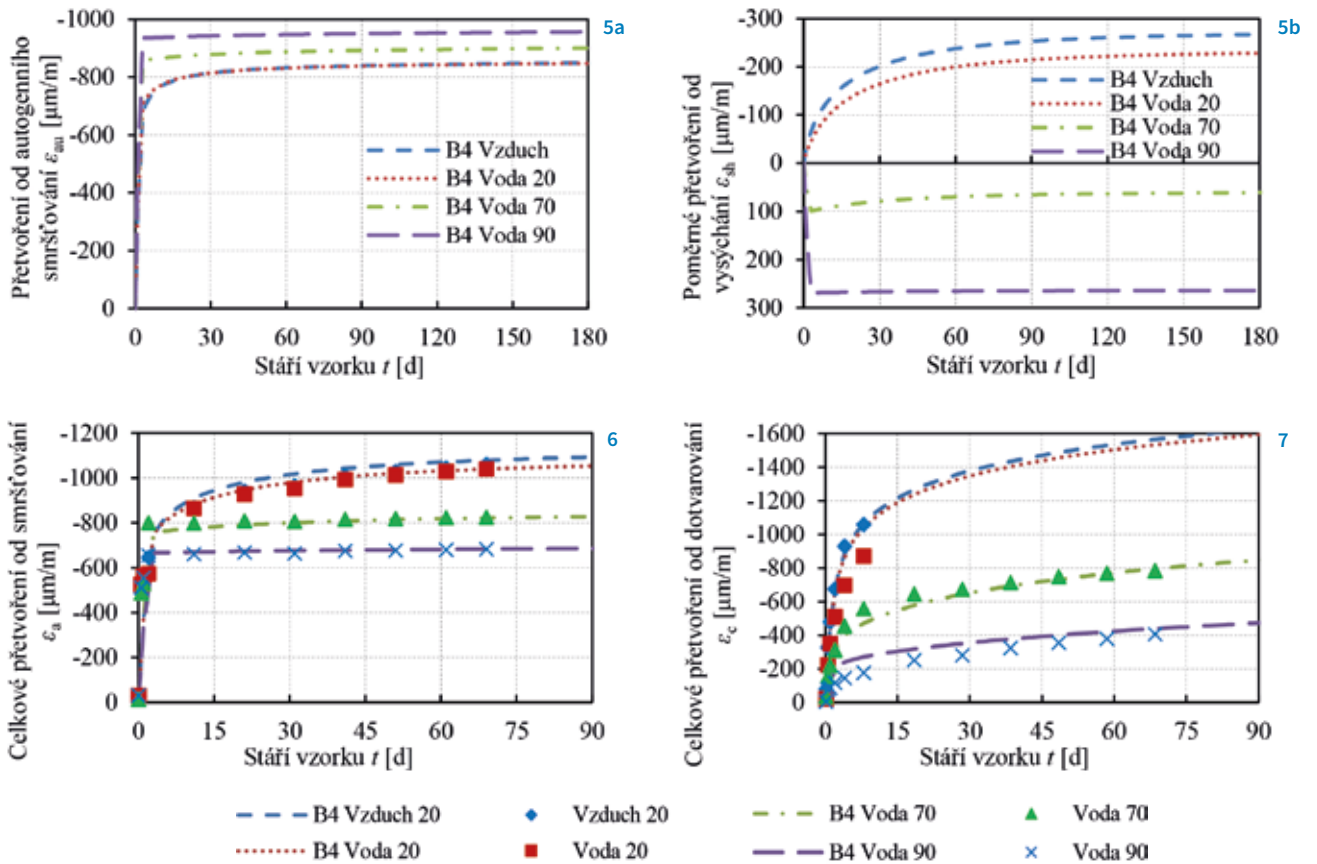
Tab. 2 Empirical coefficients for creep prediction (source: [4])

Třída použité příměsi (% z c)	$\times r_{cem}$	$\times \epsilon_{au}$	$\times r_{ew}$	$\times r_{\alpha}$
superplastifikátor ($\leq 5\%$), křemičitý úlet ($\leq 8\%$)	6,00	2,80	0,29	0,21
superplastifikátor ($\leq 5\%$), křemičitý úlet ($\geq 8\%$)	3,00	0,96	0,26	0,71
superplastifikátor ($\geq 5\%$), křemičitý úlet ($\leq 8\%$)	8,00	1,95	0,00	1,00
křemičitý úlet ($\leq 8\%$)	1,90	0,47	0,00	1,20
křemičitý úlet ($> 8\%$, $\leq 18\%$)	2,60	0,82	0,00	1,20
křemičitý úlet ($> 18\%$)	1,00	1,50	5,00	1,00
Použito pro vyhodnocení	6,00	2,28	0,00	1,00

přímý vliv. V původním modelu B4 má hodnotu $-4,5$. Pro vyhodnocení naměřených hodnot byla použita hodnota $-1,2$.

Pro predikci přetvoření od dotvarování model uvažuje i s kombinovaným účinkem superplastifikátorů a křemičitého úletu (součinitele jsou uvedeny v tab. 2), avšak reálně použité množství křemičitého úletu téměř 4násobně překračuje hodnotu poslední hraniční hodnoty při použití superplastifikátoru zároveň s křemičítým úletem. I v případě dotvarování není pro predikci možné použít žádnou z uvedených sad součinitelů.

Nespojitý charakter součinitelů příměsí při použití superplastifikátorů a velkého množství křemičitého úletu je problematický pro plošné použití modelu bez nutnosti jeho kalibrace pro použitou recepturu právě za pomoci těchto součinitelů. Tento nedostatek by bylo možné odstranit parametrickou experimentální studií vlivu příměsí a jejich kombinací na chování UHPC. Pro naměřené hodnoty byly určeny sady součinitelů tak, aby výsledky modelu B4 odpovídaly naměřeným hodnotám.



5 a), b) Nárůsty přetvoření od autogenního smršťování a od smršťování vysycháním u UHPC predikované modifikovaným modelem B4 6 Nárůst přetvoření od smršťování UHPC vzorků a porovnání s modifikovaným modelem B4 7 Nárůst přetvoření od dotvarování UHPC vzorků a porovnání s modifikovaným modelem B4 5 Development of the autogenous shrinkage and drying shrinkage strains of the UHPC and values predicted by the modified model B4 6 Development of total shrinkage strain of the UHPC measured experimentally and compared with values predicted by model B4 7 Development of creep strain of UHPC measured experimentally and compared with values predicted by model B4

Výsledky

Nárůst pevnosti betonu

Průměrná tlaková pevnost měřená na krychlicích ošetřovaných 90 °C byla 135,1 MPa v době po ukončení ošetřování (48 h po betonáži). Tato hodnota je velmi blízko průměrné 28denní pevnosti neošetřovaného vzorku, která byla 139,2 MPa. Nárůst pevností jednotlivých sad je zobrazen v grafu na obr. 4. Zároveň je z grafu patrné, že samotné ošetřování bez zvýšené teploty nemá na nárůst pevnosti téměř žádný vliv.

Smršťování

Smršťování vysycháním, u něhož se velmi výrazně projevuje účinek ošetřování, dosahuje očekávaných výrazně nižších hodnot než smršťování autogenní. Při ošetřování zvýšenou teplotou je významně urychleno zrání betonu, přičemž beton je po tuto dobu stále ve vodním prostředí. Dochází tedy k jeho bobtnání, které je ukončeno v době

ukončení ošetřování. V tu chvíli je však vzorek UHPC zralý a k difuzi vodních par nadále dochází jen ve velmi omezeném množství a vzorek zůstává dlouhodobě nabobtnán, neboť voda, která se dostala do struktury betonu v době ošetřování, je již uzamčena ve struktuře betonu. Průběh přetvoření od autogenního smršťování v čase odpovídá průběhu nárůstu pevnosti betonu při různém způsobu ošetřování. Nejvyšší hodnoty autogenního smršťování dosahují vzorky ošetřované 90 °C. Hodnota dosažená po ukončení ošetřování je dále téměř konstantní. (obr. 5)

Výše popsaný princip smršťování vysycháním je potvrzen naměřenými daty, kdy měřená hodnota celkového přetvoření od smršťování je nižší pro vzorky ošetřované vyšší teplotou ve vodním prostředí. Tyto vzorky navíc vykazují jen malý nárůst přetvoření v měsících následujících po ošetřování, což dokazuje velmi nízkou úroveň difuze vodních par po ukončení ošetřování. (obr. 6)

Dotvarování

V případě predikce přetvoření od dotvarování bylo dosaženo shody s experimenty při odhadnutí sady součinitelů příměsí odpovídající přibližné extrapolaci dostupných sad součinitelů vlivu množství příměsí, kterými byl model kalibrován. Adaptovaný a kalibrováný model B4 vykazuje velmi dobrou shodu s naměřenými hodnotami a také s měřeními z USA [1], a to jak z hlediska konečné hodnoty přetvoření od smršťování a dotvarování, tak z hlediska rychlosti jejich nárůstu. (obr. 7)

Záhy po začátku měření dotvarování vzorků došlo k selhání několika tenzometrů zabudovaných ve vzorcích Vzduch 20 a Voda 20. Validní data bylo možné získat pro tyto vzorky jen prvních 8 až 10 dnů po vnesení zatížení. Tato část experimentu je v současné době opakována, aby byla získána data popisující dlouhodobý průběh dotvarování.

Ošetřování při výrobě betonových prvků

Standardní metody ošetřování při výrobě betonových prefabrikovaných a předem předpjatých prvků můžeme rozdělit na pasivní (překrytí prvků PE fólií) a aktivní. Aktivní způsoby ošetřování jsou následující:

- překrytí propustnou tkaninou, která je periodicky zvlhčována,
- zkrápění prvků vodou v kontrolovaném prostředí (stanu),
- propařování prvků v utěsněném prostředí (stan nebo propařovací komora),
- ponoření prvků do vodního prostředí.

Literatura:

- [1] GRAYBEAL, B. A. *Material Property Characterization of Ultra-High-Performance Concrete, Final report*. Georgetown Pike, VA, U.S.A.: U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration, Office of Infrastructure Research and Development, August 2006.
- [2] AWASTHI, A., MATSUMOTO, K., NAGAI, K., ASAMOTO, S., GOTO, S. Investigation on possible causes of expansion damages in concrete – a case study of sleepers in Indian Railways. *Journal of Asian Concrete Federation*. June 2017, Vol. 3, No. 1, pp. 49–66.
- [3] HEINZ, D., LUDWIG, H. M. Heat Treatment and the Risk of DEF Delayed Ettringite Formation in UHPC. In: *Proceedings of the International Symposium on Ultra High-Performance Concrete*. Kassel, Germany, September 13–15, 2004, pp. 717–730.
- [4] BAŽANT, Z. P. RILEM Technical Committee TC-242-MDC. Model B4 for creep, drying shrinkage and autogenous shrinkage of normal and high-strength concretes with multi-decade applicability. *Materials and Structures*. March 2014.
- [5] FLIETSTRA, J. C., AHLBORN, T. M., HARRIS, D. K., SILVA, H. M. Creep Behavior of UHPC under Compressive Loading with Varying Curing Regimes. In: *Proceedings of 3rd International Symposium on UHPC and Nanotechnology for High Performance Construction materials*. 3/2012.
- [6] JAMES, T., MALACHI, A., GADZAMA, E. W., ANAMETEMFIOK, V. Effect of Curing Methods on the Compressive Strength of Concrete. *Nigerian Journal of Technology*. October 2011, Vol. 30, No. 3.
- [7] BURKART, I., MUELLER, H. S. Creep and shrinkage characteristics of ultra-high strength concrete (UHPC). In: *Proceedings of 2nd International Symposium on Ultra High-Performance Concrete*. 2008.
- [8] FRANCISCO, P., BENBOUDJEMA, F., ROUGEAU, P., TORRENTI, J. M. Creep and shrinkage prediction for a heat-treated Ultra High-Performance Fibre-Reinforced Concrete. In: *Proceedings of 3rd International Symposium on UHPC and Nanotechnology for High Performance Construction materials*. 3/2012.

Pro předem předpjaté prvky je nejčastější metodou buď zakrytí (pro dlouhé prvky), anebo propařování ve speciálních stanech či izolovaných komorách (velmi časté pro drobné prvky – betonové potrubí, předpjaté železniční pražce), jak popisuje [2]. Efekt různých způsobů ošetřování na nárůst pevnosti a omezení smršťování na ošetřovaném betonu běžných tříd je publikován v několika studiích, např. v [6] se konstatuje, že nárůst pevnosti je nejvyšší při ponoření prvků do vody, a to přibližně 8- až 10% ve srovnání s prvky zakrytými vlhčenou tkaninou. Efekt zkrápění vodou je ještě nižší než efekt zakrytí vlhčenou tkaninou (11 až 15 %).

Experimentální výsledky uvedené v tomto příspěvku podporují i pro UHPC vliv ponoření vzorků do vodního prostředí. Efekt je patrný zejména pro smršťování, kde podle jiných významných studií [1], pokud nebyly prvky ošetřovány ponořením do vodního prostředí, bylo přetvoření od smršťování tím vyšší, čím byla vyšší teplota při ošetřování a u těchto prvků nedocházelo k bobtnání, i když byly umístěny do prostředí s relativní vlhkostí blízkou 100 %. Při ponoření do vodního prostředí je efekt opačný a významný, jak je popsáno v předchozí kapitole – ponoření do vody o teplotě 90 °C redukuje celkové přetvoření od smršťování až o 50 %.

Ošetřování zvýšenou teplotou je v praxi realizováno propařováním vzorků v utěsněném prostředí stanu nebo komory. Ošetřování ponořením do vody je spíše laboratorním způsobem a v praxi jej není možné použít pro velké předem předpjaté prvky (mostní nosníky a např. stropní panely – ty je nutné ošetřovat zejména před vnesením předpětí na dlouhé dráze). Pro tyto prvky je však možné po částečném odbednění na předpínací dráze použít propařování za pomoci roztahovacích ošetřovacích stanů, příp. vzorky překryté fólií propařovat přímo.

Ponoření do vodního prostředí je teoreticky realizovatelné pro prvky nepředpjaté nebo dodatečně předpjaté – z prostorově významných prvků např. pro mostní segmenty nebo nosníky s dodatečně předpjatými

kabely. Dle výsledků experimentu je realistické uvažovat o zkrácení betonážního cyklu ze současně běžných tří dnů až na 24 h (8 h je prvek ve formě, po této době je tlaková pevnost na úrovni cca 30 MPa, a následně je 16 h ošetřován), přičemž okamžité i dlouhodobé vlastnosti ošetřovaných prvků převyšují vlastnosti i neošetřovaných prvků vyššího stáří. Tímto lze významně navýšit kapacitu výroby prefabrikovaných prvků za využití stávajících výrobních kapacit. S pořízením a provozem systému na ošetřování prvků z UHPC je spojena nutnost investice do inovace produkce, ať už se jedná o pořízení parního generátoru a ošetřovacích stanů, nebo vybudování ošetřovací komory, či prostoru pro ponoření UHPC prvků do vodního prostředí. Na ceně hotových vzorků se tato investice může podílet 5 až 10 % dle použité technologie ošetřování.

Závěr

V tomto článku bylo představeno a vyhodnoceno chování UHPC z hlediska tlakové pevnosti, smršťování a dotvarování. Ošetřováním je významně zvýšena okamžitá pevnost po ukončení ošetřování a menší měrou i dosažená 28denní pevnost (zvýšení pevnosti je přibližně 15%). Ošetřované prvky vykazují významně redukovanou míru smršťování (až 2× nižší) a dotvarování (až 4× nižší) ve srovnání s neošetřovanými vzorky. Byl zdokumentován efekt ošetřování UHPC raného stáří zvýšenou teplotou ve vodním prostředí a byla ověřena vhodnost modelu B4 pro předpověď smršťování a dotvarování UHPC. Různé způsoby ošetřování UHPC mohou vést ke zvýšení jakosti prefabrikovaných prvků za současného snížení délky betonážního cyklu při výrobě, a to až o polovinu.

Výsledky byly získány za finanční podpory z prostředků studentské grantové soutěže v rámci projektu SGS21/043/OHK1/1T/11 „Analýza chování mostních konstrukcí s prvky z UHPC“.

Experimenty byly připraveny a provedeny Kloknerovým ústavem ČVUT v Praze.



Ing. Vladimír Příbramský
Fakulta stavební ČVUT v Praze
Katedra betonových a zděných konstrukcí
vladimir.pribramsky@fsv.cvut.cz