

VLIV POPÍLKŮ NA VYBRANÉ VLASTNOSTI CEMENTOVÝCH POJIV

■ INFLUENCE OF FLY ASHES ON THE SELECTED PROPERTIES OF CEMENT BINDERS

Ondřej Zobal, Vít Šmilauer,
Wilson Ricardo Leal da Silva,
Barbora Mužíková, Pavel Padevět

Článek pojednává o úletovém popílku jako aktivní příměsi do cementového pojiva. Je zde porovnána pevnost, mrazuvzdornost, efektivní pórovitost a lomová energie cementových pojiv s a bez příměsí popílků. Závěrem je uveden nomogram, který odhaduje maximální teplotu v konstrukci během tvrdnutí s vlivem různých příměsí. ■ The paper deals with fly ash as an active admixture in cementitious binder. Cementitious binders with and without the added fly ash are compared in terms of strength, freeze/thaw resistance, effective porosity and fracture energy. At the end, a nomogram is presented which estimates maximum temperature in a structure during hydration with various admixtures.

ÚLETOVÝ ELEKTRÁRENSKÝ POPÍLEK

Úletový popílek vzniká spalováním uhlí v tepelných elektrárnách. Jedná se o heterogenní materiál, jenž je tvořen částicemi o charakteristické velikosti 0 až 100 μm , které mají převážně kulovitý sklovitý charakter (obr. 1). Jednotlivé částice mohou mít dosti odlišné fyzikální, chemické a mineralogické vlastnosti. Tyto vlastnosti jsou ovlivňovány kvalitou spalovaného uhlí a technologií spalovacího procesu [1; 2].

Úletové popílků se rozdělují dle různých klasifikací. Např. norma EN ČSN 450 dělí popílek do čtyř skupin dle obsahu SiO_2 a Al_2O_3 . Norma ASTM C618 definuje dvě skupiny F a C (české popílků odpovídají převážně skupině F). Z dalších klasifikací lze zmínit kanadskou normu CSA.A23, která vychází z působení popílku na čerstvý a tvrdnoucí cement a rozděluje popílek do tří skupin podle obsahu Ca [1; 3; 4; 5].

Dle asociace ASVEP se v České republice ročně vyprodukuje přibližně 13 mil. t vedlejších energetických produktů. Největší podíl přitom představuje úletový popílek z klasického spalování uhlí (71 %), což řadí Českou republiku mezi největší producenty popílku na jednoho obyvatele na světě. Příčinou je vysoký obsah jílovitých minerálů v uhlí.

V současné době se využívá přibližně

11 % úletových popílků do betonových a cementových směsí. Největší překážkou jejich širšího využití je pravděpodobně variabilita jejich vlastností a pomalý nárůst počáteční pevnosti. Příměs popílků naopak snižuje hydratační teplo, což je výhodné u masivních konstrukcí, kde nevádí pomalý nárůst pevnosti [6]. Variabilitu zrnitosti popílků lze vhodně optimalizovat pomocí míchání více definovaných frakcí [7].

Důležitým faktem je, že popílek v cementových a betonových směsích nevystupuje pouze jako plnivo, nýbrž se díky svým pucolánovým vlastnostem aktivně podílí na hydratačním procesu. V současné době existují betony HVFAC (High Volume Fly Ash Concrete), kde úletový popílek nahrazuje přes 50 % slinku [8].

Cílem článku je porovnání vybraných vlastností cementových past a malt s různou mírou substituce slinku. Porovnáva se pevnost v tlaku, v tahu za ohybu, objemová hmotnost, efektivní pórovitost, mrazuvzdornost a lomová energie. Závěrem je uveden nomogram, který určuje maximální teplotu betonové konstrukce během tvrdnutí také v závislosti na míře substituce popílkem.

PROVEDENÉ EXPERIMENTY

Experimenty se prováděly na cementových pastách a maltách se substitucí 0 až 70 % z hmotnosti slinku. Tab. 1 shrnuje složení cementových materiálů. Byl použit cement CEM I 42,5 R Radotín, pro pasty úletový popílek z elektrárny Mělník, pro malty úletový popílek z elektrárny Tušimice. Použité popílků splňovaly normu ČSN EN 450 [3].

Tab. 1 Složení zkušebních směsí
Tab. 1 Composition of test mixtures

Označení směsi [-]	Cement [g]	Popílek [g]	Voda [g]	Písek [g]
P1	100	0	40	-
P2	60	40	40	-
P3	50	50	40	-
P4	40	60	40	-
P5	30	70	40	-
M1	100	0	50	300
M2	75	25	50	300
M3	60	40	50	300
M4	50	50	50	300

Pevnost v tlaku

V laboratoři byla z past P1 až P5 připravena série válcových zkušebních vzorků $\text{Ø}10 \times 40$ mm. Vzorky byly uloženy při 20 °C ve vodní lázni. Zkouška pevnosti v tlaku, stejně jako zkouška pevnosti v tahu za ohybu byla prováděna na testovacím přístroji MTS Alliance RT-30 s maximální zatěžovací silou 30 kN v tlaku i tahu.

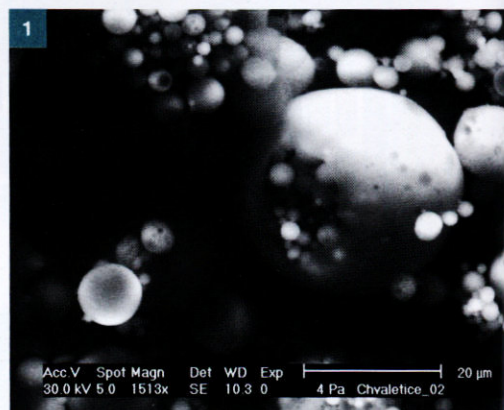
Obr. 2 ukazuje známý fakt, že pevnosti směsných cementů vykazují nižší 28denní tlakové pevnosti. Dlouhodobé pevnosti však díky pucolánové reakci popílku mohou převýšit pevnost portlandských past [4]. Původně navržená 28denní pevnost jádrového betonu 10 MPa u přehradního tělesa VD Orlik se po padesáti letech zvýšila na 38,7 MPa [9].

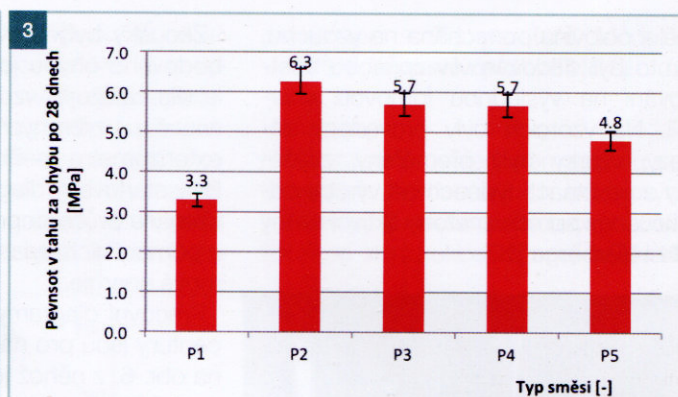
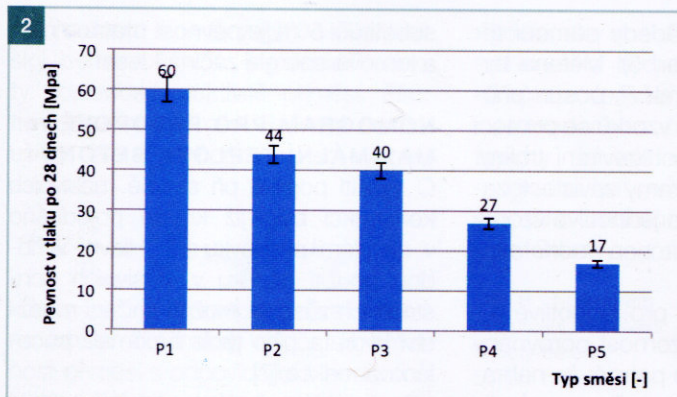
Pevnost v tahu za ohybu

Pro zkoušku pevnosti v tahu za ohybu byly z past P1 až P5 připraveny trámků o rozměrech 20 × 20 × 100 mm. Na obr. 3 jsou naměřené průměrné hodnoty po 28 dnech. U portlandské pasty je hodnota výrazně nižší než u past s příměsí popílku. Pravděpodobnou příčinou nárůstů pevností směsí s popílkem je omezení vzniku trhlin a vyšší lomová energie.

Objemová hmotnost a efektivní pórovitost

Tělesa z past P1 až P3 velikosti 40 × 40 × 80 mm byla uložena ve vodní lázni, jedna skupina vzorků jeden měsíc a druhá čtrnáct měsíců. Poté byla tělesa opatřena nátěrem z epoxidové pryskyřice, aby odpařování vody probíhalo jedním směrem. Tělesa byla vystavena teplotě 105 °C po dobu 240 h, kdy



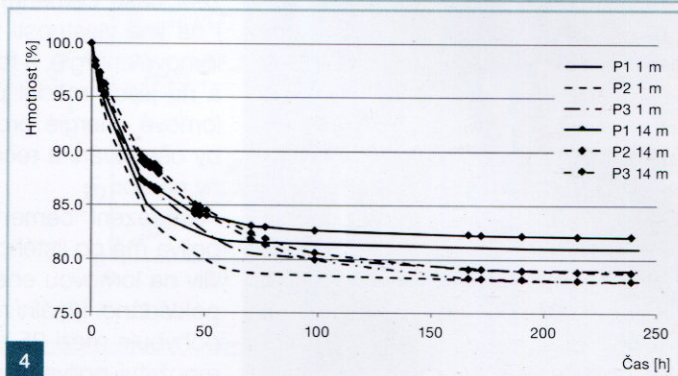


Obr. 1 Charakteristické kulovité částice popílku (elektrárna Chvaletice) | Fig. 1 Characteristic spherical particles of fly ash (power plant Chvaletice)

Obr. 2 28denní pevnosti past v tlaku | Fig. 2 Compressive strength of pastes after 28 days

Obr. 3 28denní pevnosti past v tahu za ohybu | Fig. 3 Tensile strength of pastes after 28 days

Obr. 4 Změna hmotnosti zkušebních vzorků cementové pasty s různým podílem popílku v průběhu sušení | Fig. 4 Change in the weight of specimens of cement paste with different proportion of fly ash in during drying



došlo k odpaření volné vody a ustálení hmotnosti (obr. 4).

Objemová hmotnost v saturovaném a vysušeném stavu je uvedena v tab. 2. Z výsledků je patrné, že efektivní pórovitost je cca 20 % a čím více popílku směs obsahuje, tím je pórovitost vyšší. Rozdíl mezi směsí z portlandského cementu a směsí s popílkem je minimální, popílek tedy stejně jako stáří vzorků nemá velký vliv na efektivní pórovitost.

Mrazuvzdornost

Zkušební vzorky z past P1 až P3 velikosti 40 × 40 × 160 mm byly staré sedmáct a třicet dva měsíce a po celou dobu zrání byly uloženy ve vodě při 20 °C. Metodika měření mrazuvzdornosti vychází z normy ČSN 73 1322 a jedná se o destruktivní metodu měření. Tento postup nezahrnuje účinky prostředí se solemi (např. chloridů).

Tab. 2 Průměrné hodnoty objemové hmotnosti pro každou směs a její efektivní pórovitost | Tab. 2 Average values of volume density for each mixture and their effective porosity

Směs	ρ_{sat} [kg/m ³]	ρ_{vys} [kg/m ³]	Efektivní pórovitost [%]
P1 1m	1 996	1 616,951	17,9
P1 14m	2 011,82	1 651,535	19
P2 1m	1 815	1 416,04	21,2
P2 14m	1 824,075	1 437,126	22
P3 1m	1 812,567	1 430,977	22,1
P3 14m	1 779,493	1 386,952	21,1

Vzorky byly postupně podrobeny 50, 100 a 150 zmrazovacím cyklům. Každý cyklus se skládá ze dvou fází. První fáze je zmrazování – teplota – 20 °C, doba trvání 4 h. Druhá fáze je rozmrazování – teplota +20 °C, doba trvání 2 h. Sledovaným parametrem je změna hmotnosti jednotlivých zkušebních těles, případně i hmotnost odpadu po každé sadě cyklů. Pro měření byla použita klimatická komora firmy Weiss WKL 100.

Na měření bylo použito šest skupin zkušebních těles (tři různé směsi, dvě různá stáří). Od každé směsi byly použity tři zkušební vzorky (celkem osmáct zkušebních těles). Pro zkoušku byla tedy plně saturována. Z naměřených rozměrů a hmotnosti byla dopočítána objemová hmotnost. Na objemovou hmotnost nemá vliv stáří vzorků (rozdíl do 1,6 %). Tab. 3 shrnuje objemové hmotnosti vzorků před měřením a hmot-

Tab. 3 Objemová hmotnost a hmotnost všech směsí během měření | Tab. 3 Volume density and the weight of all mixtures during the measurement

Označení [-]	Stáří vzorků [měsíce]	Průměrná objemová hmotnost [kg/m ³]	Ø Průměrná hmotnost [g]			
			před zmrazovacími cykly	po 50 cyklech	po 100 cyklech	po 150 cyklech
P1 new	17	1 990	481	480	479	474
P1 old	32	1 962	501	500	499	496
P2 new	17	1 844	465	463	462	459
P2 old	32	1 856	448	447	446	442
P3 new	17	1 780	456	455	454	451
P3 old	32	1 806	434	433	432	429

nosti před a po zmrazovacích cyklech.

Po maximálním počtu zmrazovacích cyklů (150 cyklů) je ztráta hmotnosti minimální (maximálně 1,6 % oproti nezmrazeným vzorkům) na všech vzorcích. Odpad nevznikl žádný. Vzorky všech směsí lze tedy prohlásit za mrazuvzdorné po 150 zmrazovacích cyklech (limitní hodnota je 5 %). Substituce slinku neměla negativní vliv na tuto vlastnost.

Problém je, že se po 150 zmrazovacích cyklech objevilo větší množství trhlin na vzorcích s popílkem, což negativně ovlivňuje případné nedestruktivní zkoušky mrazuvzdornosti a samozřejmě i pevnost vzorků.

Lomová energie

Experiment se zabýval měřením lomové energie na maltách M1 až M4 (tab. 1). Po výrobě byla polovina vzorků uložena k vytvrzení do vodní láz-

ně a polovina ponechána na vzduchu, tímto byl sledován vliv způsobu ošetřování na výslednou lomovou energii. Na vzorcích byly provedeny zářezy, vzorky byly přeměřeny, zváženy a po čtrnácti týdnech od výroby odzkoušeny pomocí metody fiktivní trhliny dle Hillerborga [10].

Zkoušky byly prováděny pomocí tříbodového ohybu (obr. 5). Měřena byla síla zatěžující vzorek P , posun příčnicku δ a u vybraných vzorků se pomocí extenzometru měřilo rozevírání trhliny. Byly stanoveny diagramy závislosti zatížení na průhybu pro jednotlivé vzorky a pomocí nich byla určena hodnota lomové energie.

Pracovní diagramy pro jednotlivé receptury jsou pro názornost porovnány na obr. 6, z něhož je patrné, že nahrazení části cementu popílkem má vliv i na jiné vlastnosti kromě zde řešené lomové energie, a to na pevnost tělísek a na jejich modul pružnosti. Hodnoty lomové energie pro jednotlivé způsoby ošetřování a receptury jsou uvedeny na obr. 7.

Nahrazení cementu popílkem jako pojiva má do jistého množství pozitivní vliv na lomovou energii, jak bylo předpokládáno. Ideální množství popílku se pohybuje mezi 25 až 40 % celkového množství pojiva, tedy množství obsažené ve směsích M2 a M3.

Při postupném přidávání popílku na 25 až 40 % jsou však vyšší hodnoty u suchých vzorků než u vzorků saturovaných (obr. 7). Postupné přidávání popílku do 40% substituce (malty M2, M3) mírně zvyšuje lomovou energii. Dodatečná energie pochází z růstu trhlin okolo popílkových částic a jejich vytahování z matrice C-S-H gelu. Při

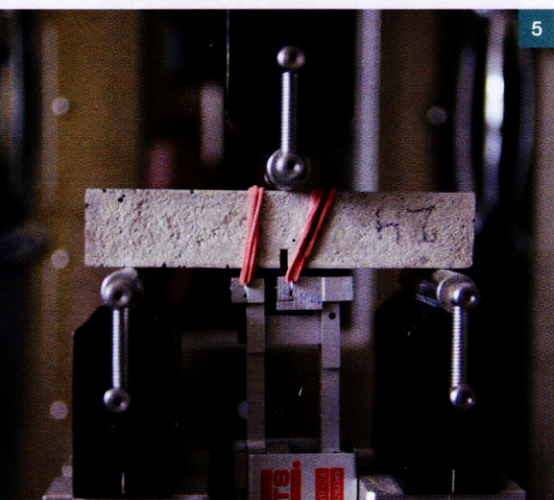
substituci 50% je pevnost matrice nižší a lomová energie začíná klesat.

NOMOGRAM PRO PŘEDPOVĚĎ MAXIMÁLNÍ TEPLoty BETONU

O využití popílků při stavbě masivních konstrukcí bylo již krátce pojednáno v minulém příspěvku [6]. Hlavní výhodou použití popílku v masivních konstrukcích zůstává možné snížení množství hydratačního tepla a pomalá pucolánová reakce [7].

Pro rychlý odhad maximální teploty během hydratace betonu byl dříve vytvořen nomogram [6]. Ten bude nyní rozšířen o další příměsi, např. popílků třídy C a F dle ASTM C618, mikromletý vápenec, strusku a mikrosiliku [11]. Obr. 8 ukazuje příspěvek příměsí k uvolněnému teplu cementových past během izotermální kalorimetrie [6, 12, 13, 14]. Z porovnání křivek pro jednotlivé měřené sady vyplývá, že popílek třídy F přispívá k hydratačnímu teplu poměrně málo, zatímco reakci strusky či popílku třídy C nelze zanedbat.

Příspěvek příměsí k hydratačnímu teplu Portlandského cementu vyjádříme zjednodušeně pomocí k -hodnoty (cementing efficiency factor k), kterou původně zavedl Smith v roce 1967 [15] pro nárůst pevnosti betonu a nyní je převzata do dalších norem. k -hodnotu zde použijeme pro příspěvek uvolňovaného tepla, kde inertní materiál



5

Obr. 5 Průběh měření

■ Fig. 5 The real test

Obr. 6 Pracovní diagramy

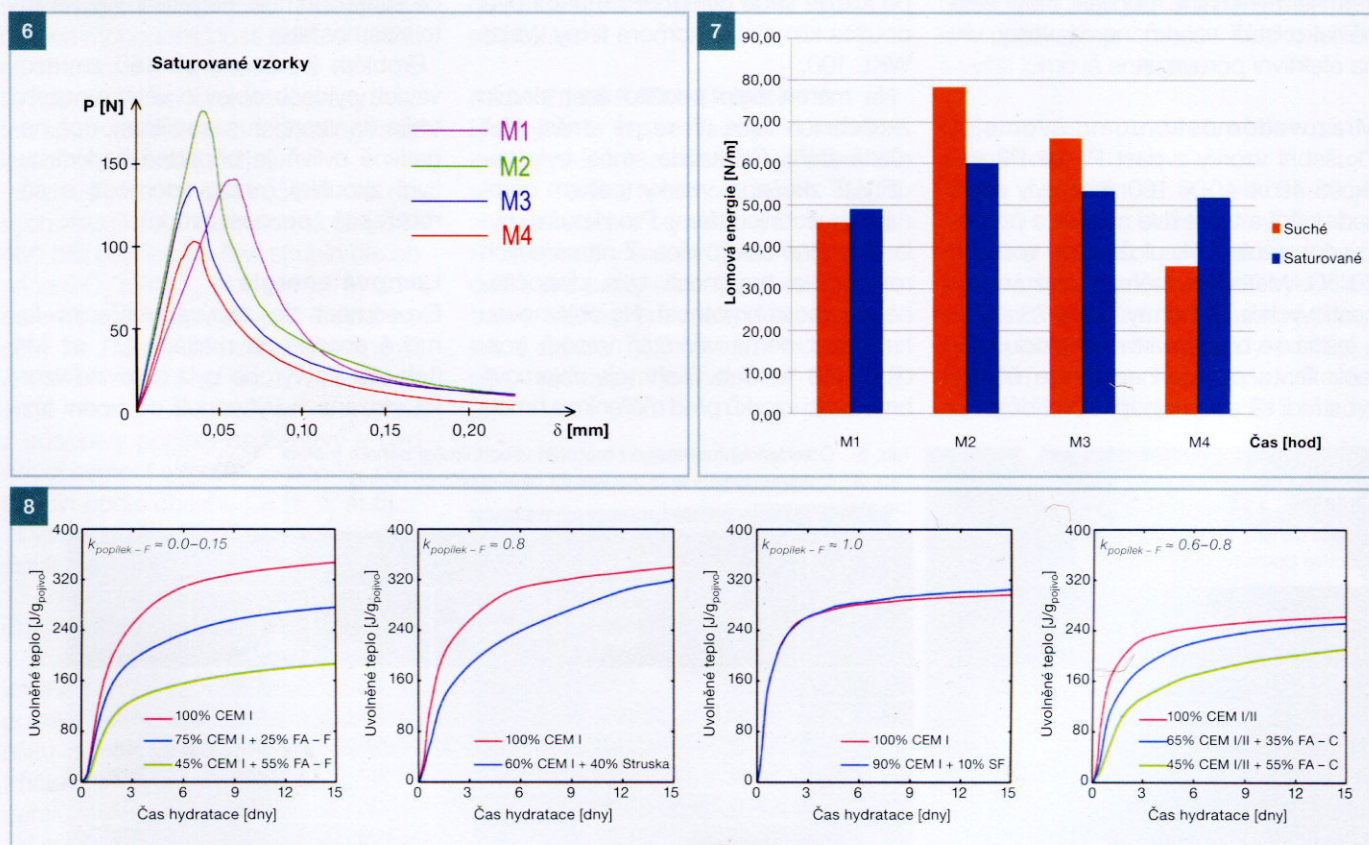
Fig. 6 Load-deflection curves

Obr. 7 Lomová energie

■ Fig. 7 Fracture energy

Obr. 8 Hydratační teplo směsných cementů při izotermální kalorimetrii 20 °C

Fig. 8 Hydration heat of blended binders during isothermal calorimetry at 20 °C



má hodnotu $k = 0$, zatímco Portlandský cement $k = 1$. Meziřehlé hodnoty odpovídají reaktivitě příměsí. Efektivní hodnota příměsí S , která se používá dále v nomogramu, se vypočte z rovnice

$$S = \frac{1}{m_{\text{pojivo}}} \sum_{i=1}^n m_{\text{příměs},i} (1 - k_{\text{příměs},i}),$$

kde m_{pojivo} je hmotnost pojiva v betonu (slinek a příměsí), $m_{\text{příměs}}$ je hmotnost příměsí s odpovídající k -hodnotou. Následující k -hodnoty vychází převážně z obr. 8, kdy se určil průměr poměrů hydratačních tepel ve 3, 7, 14 dnech:

- $k = 0$ až 0,15 pro velmi malou reaktivitu: mikromletý vápenec, křemenná moučka, nemletý úletový popílek třídy F,
- $k = 0,5$ pro malou reaktivitu: jemně mletý úletový popílek třídy F,
- $k = 0,8$ pro střední reaktivitu: struska a úletový popílek třídy C,
- $k = 1$ pro vysokou reaktivitu: mikro-silika.

k -hodnota není během hydratace konstantní, popílek či struska mají opožděnou reaktivitu oproti slinku, navíc vykazuje variabilitu dle reaktivnosti příměsí. Průměrná hodnota ze 3, 7 a 14 dnů je vybrána jako kompromis mezi měřenými daty hydratačních tepel a časem maximální teploty na betonové konstrukci.

Nomogram vychází ze simulace 1D vedení tepla, které bylo popsáno dříve [6]. V simulaci a v nomogramu se vyskytuje pět parametrů, které mají následující význam a kde se uvažovaly následující rozsahy hodnot:

- m_{pojivo} – hmotnost pojiva (slinek a příměsí) (0 až 500 kg/m³),
- S – efektivní hodnota příměsí (0 až 75 %),
- t – tloušťka prvku, na obou stranách se uvažuje disipace tepla do okolí (0,5 až 4 m),
- T_i – počáteční teplota betonu (5 až 30 °C),
- T_a – konstantní teplota vzduchu (0 až 40 °C).

Statistická analýza hodnot mezi simulací a nomogramem vede k směrodatné odchylce 6,8 °C pro hladinu spolehlivosti 90 % [11]. To znamená, že nomogram poměrně dobře ilustruje chování 1D modelu vedení tepla. Obr. 9 ukazuje výsledný nomogram pro předpověď maximální teploty během tvrdnutí betonu včetně vlivu příměsí. Nomogram zároveň ukazuje způsob zadávání dat a odečtení výsledné teploty. Pro jiný základ pojiva než CEM I 42,5 R je třeba výsledky ko-

rigovat dle obr. 10. Příčinou je odlišná kinetika hydratace pojiva a změna času dosažení maximální teploty.

Jednoduchou předpověď výsledné teploty na základě uvedeného nomogramu je možné stáhnout zdarma jako mobilní aplikaci v Apple's App Store pod názvem „Mass Con-

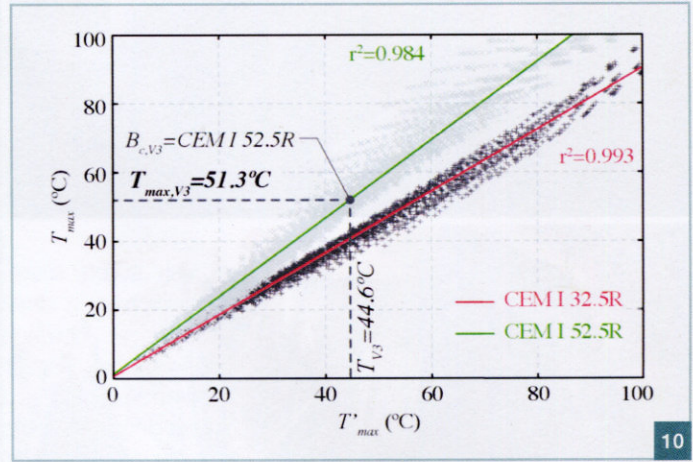
crete App – Temperature Module“, viz <https://appsto.re/dk/tEMB1.i>.

Validace

Pro validaci a ověření nomogramu bylo vybráno šest masivních betonových konstrukcí z celého světa (obr. 11). Validované konstrukce zahrnují přehradu

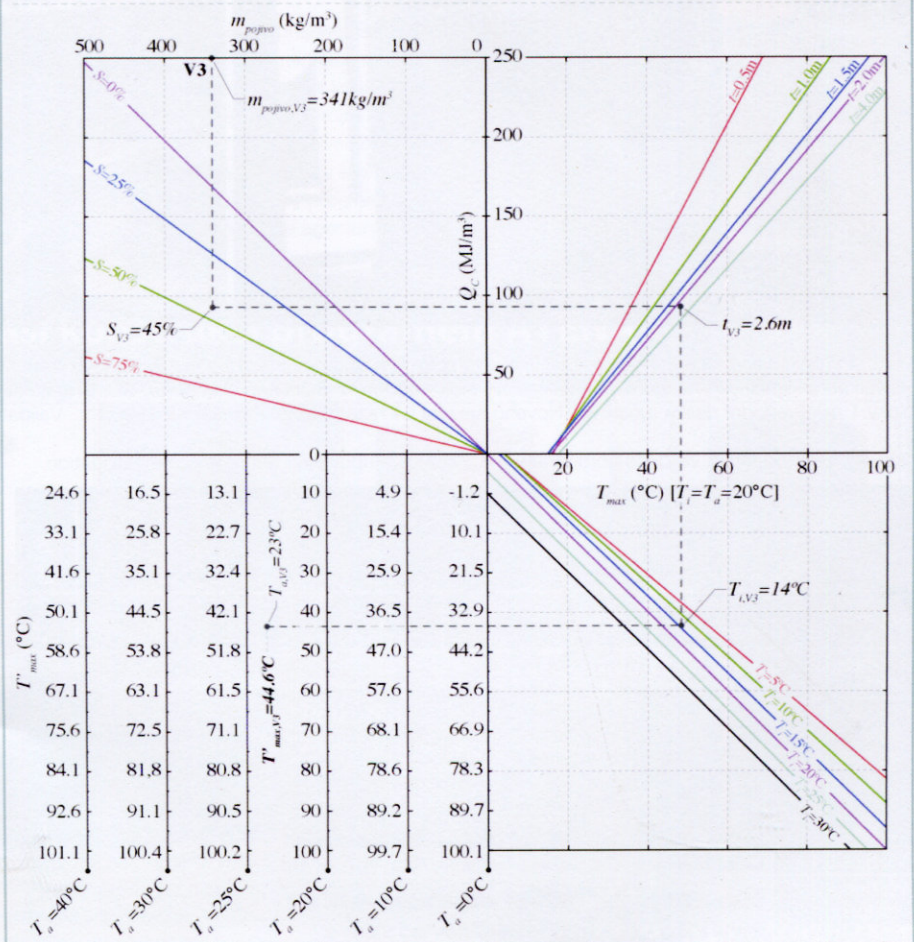
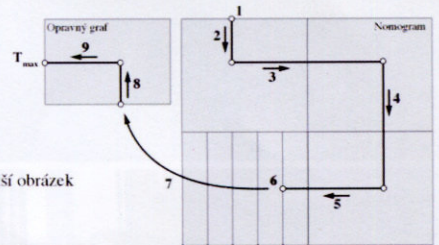
Obr. 9 Nomogram pro určení maximální teploty betonu během tvrdnutí
Fig. 9 Nomogram for maximum concrete temperature during hardening

Obr. 10 Korekce pro jiný základ pojiva než CEM I 42,5 R
Fig. 10 Correction for binder basis different from CEM I 42,5 R



9 Použití nomogramu:

1. Určete celkové množství pojiva, m_{pojivo} (kg m⁻³)
2. Určete efektivní hodnotu příměsí, S (%)
3. Určete tloušťku prvku, t (m)
4. Určete počáteční teplotu betonu, T_i (°C)
5. Určete konstantní teplotu vzduchu, T_a (°C)
6. Odečtěte maximální teplotu, T'_{max} (°C)
7. Pro jiný základ pojiva než CEM I 42.5R, použijte další obrázek
8. Vložte T'_{max} (°C) z kroku 6 a určete základ pojiva, B_c
9. Odečtěte opravenou hodnotu, T_{max} (°C)





Obr. 11 Validované konstrukce pro maximální teploty, a) přehrada Orlík, b) půlka základové desky 36 x 17 x 0,65 m chrámu na ostrově Kauai, Hawaii (foto Himalayan Academy), c) základový blok 1050 m³ v Balneário Camboriú, SC, Brazílie (foto Formula F10 Empreendimentos), d,e) dva bloky 1 m³, f) spodní deska mostovky Nového spojení v Praze (foto D. Prause) ■ Fig. 11 Validated constructions for maximum temperatures

Tab. 4 Vstupní data a validace nomogramu ■ Tab. 4 Input data and nomogram validation

Konstrukce	Základ pojiva B _c	Příměs ¹⁾	m _{pojivo} [kg/m ³]	S [%]	t [m]	T _i [°C]	T _a [°C]	T _{max,m} [°C]	T _{max,n} [°C]	ΔT [°C]
								Změřeno	Předpověď	Chyba
V1: Přehrada Orlík	CEM I 32,5R	28 % popílek F + 22 % struska	180	32,4	2	18	25	40	34,1	-5,9
V2: Základová deska chrámu na Hawaii	CEM I 42,5R	58 % popílek F	250	58	0,65	20	25	30,5	33	+2,5
V3: Základový blok 1050 m ³	CEM I 52,5R	45 % popílek F	341	45	2,6	14	23	51	51,3	+0,3
V4: Blok A 1 m ³	CEM I 52,5R	45 % popílek F	420	45	1	23	23	55,5	58,9	+3,4
V5: Blok B 1 m ³	CEM I 42,5R	–	310	0	1	18	15	50,2	55,6	+5,4
V6: Deska mostovky	CEM I 42,5R	5 % mikromletý vápenc	400	5	0,7	15 ²⁾	25 ²⁾	56,2	57,2	+1

¹⁾ Hmotnostní podíl v pojivu, ²⁾ Odhadnuté hodnoty

Orlík, půlku základové desky 36 × 17 × 0,65 m chrámu na ostrově Kauai, Hawaii, základový blok 1 050 m³ v Balneário Camboriú, SC, Brazílie, dva bloky 1 m³ a spodní desku mostovky Nového spojení v Praze.

Obr. 9 ukazuje zadání vstupních hodnot pro validaci V3. Rozdíly maximálních teplot při validaci v tab. 4 mají různý původ: od přepočtu modelu na nomogram, nepřesné okrajové podmínky (izolace povrchu betonu, tepelné charakteristiky betonu, kontinuální betonáž, teplota vzduchu, oslunění), či nepřesnou počáteční teplotu betonu. Validace přesto ukazují poměrně malé od-

Literatura:

- [1] Fečko P. a kol.: Popílky, Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, 2003
- [2] Lutze D., vom Berg W.: Příručka – Popílek do betonu: Základy výroby a použití, nakladatelství ČEZ Energetické produkty, s. r. o., 2013
- [3] ČSI: ČSN EN 450 Popílek do betonu, Praha, 2008
- [4] Neville A. M.: Properties of concrete, New York, 2009
- [5] Ahmaruzzaman: M.: A review on the utilization of fly ash, Progress in Energy and Combustion Science 36, 2010
- [6] Šmilauer V. a kol.: Využití úletového popílku pro betonáž masivních konstrukcí, Beton TKS 2/2014, str. 60–65
- [7] Zabal O., Padevět P., Šmilauer V., Bittnar Z.: Problems with variability in using fly ash in mixed cement, Advanced Materials Research vol. 969, 2014
- [8] United Kingdom Quality Ash Association: High volume fly ash concrete, Technical data sheet 1.8, 2012
- [9] Zabal O. a kol.: Analýza betonu z tělesa přehrady Orlik po padesáti letech, Beton TKS 2/2014, str. 19–25
- [10] Surenda P.: Fracture mechanics of concrete, 1st ed. New York: John Wiley and Sons, 1995
- [11] Da Silva W. R. L., Šmilauer V.: Nomogram for maximum temperature of mass concrete structures, Concrete International, v tisku, 2015
- [12] Kocaba V.: Development and evaluation of methods to follow microstructural development of cementitious systems including slags, PhD Thesis, École Polytechnique Fédérale de Lausanne, Lausanne, CH, October 2009
- [13] Varga I. a kol.: Application of internal curing for mixtures containing high volumes of fly ash, Cement and Concrete Composites 34, 2012
- [14] Pane I., Hansen W.: Investigation of blended cement hydration by isothermal calorimetry and thermal analysis, Cement and Concrete Research 35, 2005
- [15] Smith I. A.: The design of fly ash concretes, Proc. Inst. Civil Eng. London, Vol. 36, 1967
- [16] Pertold Z. a kol.: Alkalicko-křemičitá reakce v České republice a možnosti její eliminace, Beton TKS 2/2014, str. 34–41
- [17] Carmela A. a kol.: The use of fly ash in EDP hydro projects, Proc. of Intern. conf. EuroCoalAsh 2014, pp. 107–117

chylky a potvrzují správnost nomogramu na různých konstrukcích.

Prezentovaný nomogram umožňuje předpovídat maximální teploty během tvrdnutí betonu pro Portlandské cementy i směsná pojiva s příměsí popílku, strusky a dalších minerálních látek. Pro přesnější popis teplotního pole je třeba použít přímé řešení rovnice vedení tepla, pro inženýrské aplikace však použití nomogramu ve velké míře dostačuje.

ZÁVĚR

Úletový popílek nachází svoje uplatnění při výrobě cementových pojiv. Jak ukazují série experimentů nejen z tohoto článku, náhrada slinku úletovým popílkem do přibližně 40 % hmotnosti představuje přijatelnou mez. Další zvýšení obvykle vyžaduje dodatečné třídění či míšení popílků a definování dalších vlastností nad rámec norem. Úletový popílek se efektivně používá pro zmen-

šení hydratačního tepla pojiva, jak je ukázáno v nomogramu a ve validacích na masivních konstrukcích.

Popílek nalezl uplatnění pro zmenšení rizika a průběhu alkalicko-křemičitě reakce [16]. V současné době probíhá výstavba pěti velkých přehrad ve Španělsku se spotřebou betonu 2,3 mil. m³ [17]. Energias de Portugal specifikuje v přehradách minimální podíl popílku 30 % pro zachování trvanlivosti konstrukce. Pět nových budovaných přehrad obsahuje okolo 50 % úletového popílku.

Příspěvek vznikl za podpory projektu SGS 14/122/OHK1/2T/11 – Experimentální metody použitelné pro analýzu materiálů a konstrukcí, dále za podpory Evropské unie, projektu OP Vpplč.CZ.1.05/2.1.00/03.0091 – Univerzitní centrum energeticky efektivních budov a projektu CESTI TE01020168 za podpory programu Centra kompetence Technologické agentury České republiky (TAČR).

Ing. Ondřej Zabal
e-mail: ondrej.zabal@fsv.cvut.cz
tel.: 224 354 495



doc. Ing. Vít Šmilauer, Ph.D.
e-mail: vit.smilauer@fsv.cvut.cz
tel.: 224 354 483



Ing. Wilson Ricardo Leal da Silva, Ph.D.
e-mail: wilson.silva@fsv.cvut.cz
tel.: 224 354 629



Bc. Barbora Mužíková
e-mail: barbora.muзикova@fsv.cvut.cz
tel.: 224 354 484



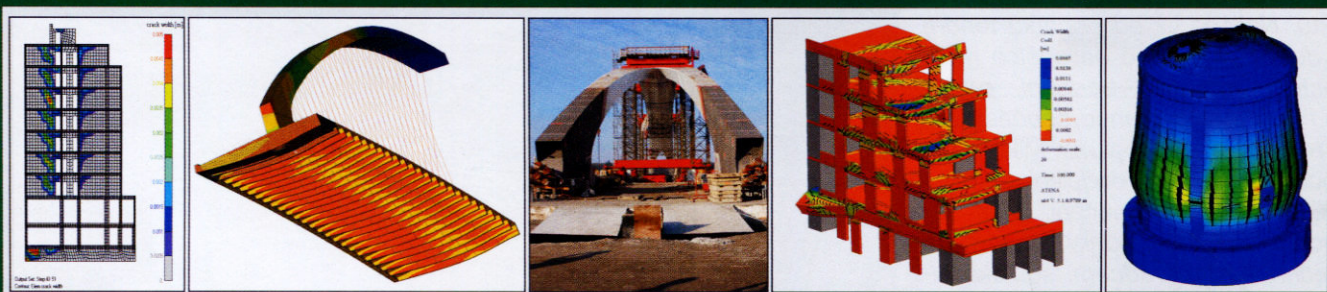
Ing. Pavel Padevět, Ph.D.
e-mail: pavel.padevet@fsv.cvut.cz
tel.: 224 354 484



všichni: Katedra mechaniky
Fakulta stavební ČVUT v Praze
Thákurova 7, 166 29 Praha 6

Ověřte Vaši konstrukci programem ATENA!

Připojte se ke špičkovým inženýrům, kteří používají počítačovou simulaci pro kontrolu a navrhování bezpečných a spolehlivých staveb.



Nabízíme:

- jedinečný software pro nelineární analýzu a hodnocení bezpečnosti
 - programy ATENA Engineering, ATENA Science, SARA
- uživatelskou podporu a údržbu
- poradenství v oblasti nelineárních výpočtů a spolehlivosti konstrukcí

Použití pro:

- budovy, mosty, energetické, vodohospodářské a podzemní stavby
- prostý a vyztužený beton, drátkobeton, vláknobeton
- stanovení šířky trhlin, průhybů, optimalizaci výztuže
- ověření únosnosti, odolnosti, spolehlivosti, zesilování konstrukcí



Objednejte nyní novou verzi 5.1
s podporou paralelního výpočtu

Na Hřebenkách 55 • 150 00 Praha 5 • tel: +420 220 610 018
e-mail: cervenka@cervenka.cz • web: www.cervenka.cz