

VLIV CYKlickÉHO PŮSOBENÍ MRAZU V RANÝCH FÁZÍCH HYDRATACE NA KONEČNOU PEVNOST BETONU

Roman Chylik, *

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

ABSTRAKT

Následující příspěvek se zabývá problematikou betonáže za nízkých teplot, kdy je beton v raných fázích hydratace vystaven zmrazovacím cyklům. Kromě obecně známých pravidel, která jsou doporučena při betonáži za nízkých teplot, existuje možnost aplikace přísady dusičnanu vápenatého. Prvotní aplikace dusičnanu vápenatého do betonu pochází ze Skandinávie, tedy z oblasti, kde je kratší stavební sezóna a vznikla poptávka hledat varianty, jak realizovat betonáž i za teplot pod bodem mrazu. V článku jsou prezentovány dílčí výsledky rozsáhlé studie vlivu dusičnanu vápenatého na hydrataci betonu, který je vystaven cyklickému působení mrazu v průběhu hydratace.

KLÍČOVÁ SLOVA

Hydratace betonu • Dusičnan vápenatý • Tlaková pevnost

ABSTRACT

The following paper deals with the issue of casting of concrete at low temperatures, when concrete is exposed to freezing cycles in the early stages of hydration. In addition to the generally known rules that are recommended for casting of concrete at low temperatures, there is the possibility of applying a calcium nitrate additive. The initial application of calcium nitrate to concrete comes from Scandinavia, ie from an area where the construction season is shorter and there is a demand to look for ways to carry out concreting even at temperatures below freezing. The article presents partial results of an extensive study of the effect of calcium nitrate on the hydration of concrete, which is exposed to the freeze and thaw cycles during hydration.

KEYWORDS

Hydration of concrete • Calcium nitrate • Compressive strength

1. ÚVOD

Je všeobecně známo, že při ukládání betonu by se měla teplota pohybovat optimálně mezi 15°C a 25°C. Při teplotách vyšších než 25°C hrozí riziko ztráty konzistence betonu vlivem urychleného odpařování vody nebo zrychlená ztráta konzistence vlivem urychleného tuhnutí a tvrdnutí betonu. Za velmi nebezpečné ze rovněž považovat riziko vysoké teploty dosažené uvnitř konstrukce vlivem vysoké teploty čerstvého betonu a přídavného tepla vzniklého hydratací betonu. Tato vysoká teplota má za následek vyšší vynucená namáhání v konstrukci vlivem vysokého teplotního gradientu při tuhnutí a tvrdnutí betonu a při následném vychládání konstrukce. Negativní vliv na hydrataci betonu má rovněž teplota nižší jak výše zmíněných 15°C. Při betonování mezi 5°C a 15°C nehrozí riziko snížené pevnosti betonu, avšak beton hydratuje pomaleji a normové konečné pevnosti dosahuje déle než v 28 dnech. Za limitní je považována teplota 5 °C, při které dochází k výraznému zpomalení hydratace. Při teplotě 0 °C a níže dochází téměř k zastavení procesu hydratace. Při procesu hydratace může hydratující beton zmrznout a opětovně rozmrznout, aniž by došlo k znatelnému porušení jeho struktury. Tento stav nastane pokud:

- $Rb^1 < 0,1 \text{ MPa}$ – Pevnost betonu je minimální, hydratace a růst hydratačních produktů ještě nezačal. Beton je ve fázi tuhnutí.
- $Rb^2 > Rz$, kdy Rz značí zmrazovací pevnost betonu, která se dle ČSN P ENV 13671-1 rovná 5 MPa. Při dosažení meze Rz (zmrazovací pevnost) je beton schopný odolat jednomu zmrazovacímu cyklu bez zjevných známek poškození.
- $Rb > Rmin^3$, kdy $Rmin$ dosahuje hodnot v rozmezí 12–20 MPa. Při těchto pevnostech je hydratující beton schopný přežít i několik (cca 25) po sobě jdoucích zmrazovacích cyklů

Nejvíce kritické období při hydrataci betonu tedy nastává při pevnostním rozmezí mezi 0,1 – 5 MPa. Mráz působící na

¹ Rb – Aktuální pevnost hydratujícího betonu

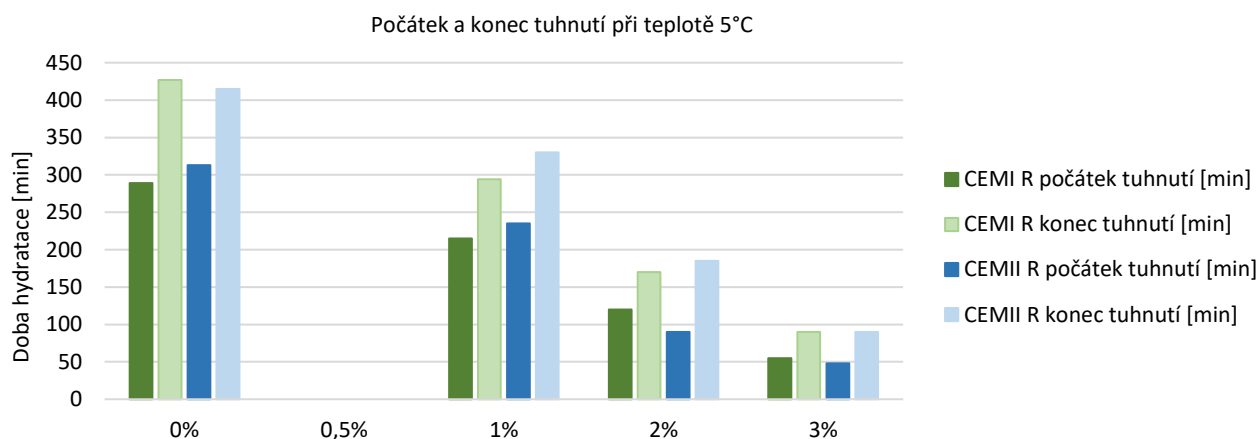
² Rz – Zmrazovací pevnost betonu, tj. pevnost hydratujícího betonu, při které je schopen odolat jednomu zmrazovacímu cyklu bez známek poškození

³ $Rmin$ – Minimální pevnost hydratujícího betonu, tj. pevnost, při které je beton schopen odolat několika po sobě jdoucím zmrazovacím cyklům bez poškození

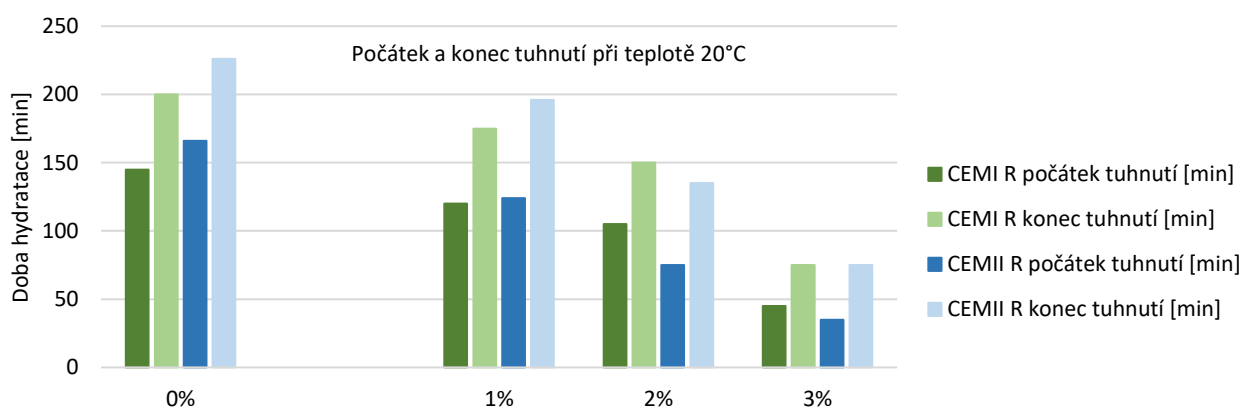
hydratující beton způsobí změnu skupenství vody z kapalného na pevné, čímž dojde k nárůstu objemu o cca 9 %. Vytvořením ledových krystalů ve struktuře betonu vznikne porušení cementového tmelu a nenávratné porušení hydratující cementové matrice. Po opětovném ohřátí a pokračování hydratace beton není schopný nabýt požadovaných pevností a je znehodnocen. Negativní vliv nízkých teplot při betonáži a v době tuhnutí a tvrdnutí betonu lze kompenzovat použitím vhodné receptury betonové směsi. Jedná se zejména o použití rychle tuhnoucího cementu nebo vhodné přísady.

Prezentovaná data jsou dílčí výsledky obsáhlé studie zaměřené na vliv přísady dusičnanu vápenatého, který je používán jako jedna ze složek komerčně vyráběných urychlovacích přísad, na hydrataci betonu za nízkých teplot. Pro úplnost jsou rovněž prezentována data porovnávající hydrataci betonu vystaveného mrazu po celou dobu hydratace v porovnání s betonem hydratujícím v ideálních laboratorních podmínkách.

Vliv dusičnanu vápenatého na rychlost hydratace betonu byl prokázán několika studiemi. Ogubonde (Ogubonde 2011) ve své studii prezentoval, že již přidání 1% dusičnanu vápenatého z hmotnosti cementu zkrátí počátek a konec tuhnutí betonu o 20% ve srovnání s betonem referenčním. Chikn (Chikn, 2007) ve své práci rozšířil vliv dusičnanu vápenatého na počátek a konec tuhnutí pro různé typy cementu. Zatímco u směsi obsahující cement kategorie CEM I zkrátí dusičnan vápenatý dobu počátku a konce tuhnutí o cca 5%, v případě cementu CEM II, který vykazuje pomalejší hydrataci a nižší vývin hydratačního tepla, byla doba počátku a konce tuhnutí redukována o 25%. Kičaitė (Kičaitė 2017) ve své práci prezentoval vliv dusičnanu vápenatého v množství 1%, 2% a 3% z hmotnosti cementu na rychlost hydratace při teplotách limitních pro hydrataci, tj. 5°C a teplotách laboratorních, tj. 20°C.



Obrázek 1 : Počátek a konec tuhnutí při teplotě 5°C. [3]



Obrázek 2 : Počátek a konec tuhnutí při teplotě 20°C.[3]

Z výše uvedených grafů je zřejmé, že dusičnan vápenatý výrazně zkracuje dobu počátku a konce tuhnutí, a to i v případě hydratace za nízké teploty. Tato skutečnost umožňuje využít dusičnan vápenatý jako přísadu, která urychlí hydrataci, zvýší

vývin hydratačního tepla a umožní provádět betonáž konstrukce i za nízkých teplot. Dusičnan vápenatý v betonu způsobuje vápenatým iontem rychlejší tvorbu hydroxidu vápenatého. Dusičnan s trikalcialuminátem a vodou vytváří

* Školitel: doc. Ing. Jitka Vašková, CSc.

komplexní sloučeniny, které zvyšují rychlost tvorby hydroxidu vápenatého.

2. METODA ŘEŠENÍ

2.1. Stručná metodika řešení

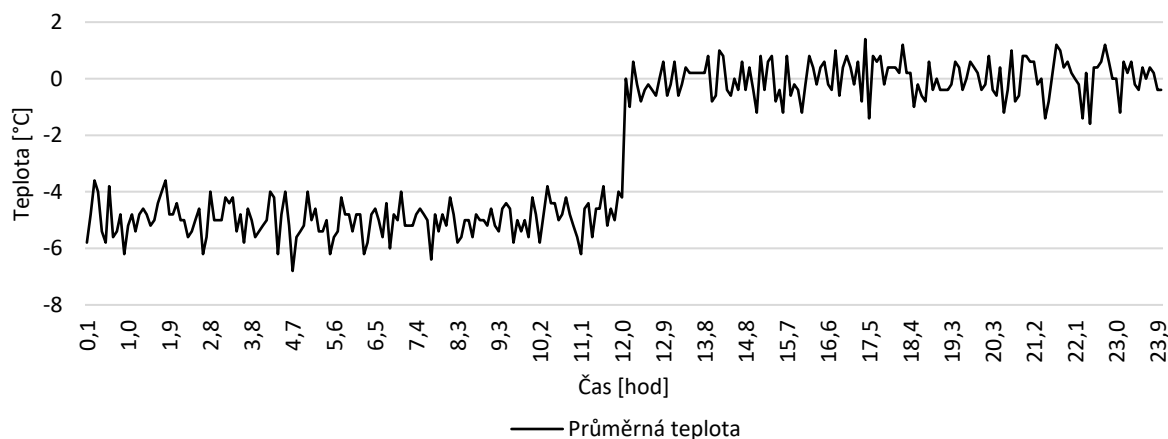
Pro výzkum byla použita referenční receptura a receptura obsahující přísadu dusičnanu vápenatého. Referenční receptura je znázorněna v tabulce 1. Příklad přísady dusičnanu vápenatého byla dávkována v množství 8,2 kg/m³, což odpovídá množství 2% z hmotnosti cementu.

Tabulka 1: Složení referenční směsi (REF).

Složka	Obsah [kg/m ³]
cement	410
voda	200
v/c	0,49
kamenivo 8/16	620
kamenivo 4/8	340
kamenivo 0/4	840

Dávkování dusičnanu vápenatého se zabývaly studie například (Ogubonde 2011, Kičaitė 2017), které stanovily optimální množství mezi 1% a 5% z hmotnosti cementu. Tyto studie rovněž uvedly, že nižší množství dusičnanu vápenatého v betonové směsi přispívá pozitivně k 28 denním pevnostem, zatímco vyšší množství značně zvyšuje pevnosti v raném stadiu hydratace a negativně působí na pevnosti 28 denní. Z důvodu aplikovatelnosti výsledků ve stavební praxi, kdy jsou konstrukce navrhovány převážně na 28 denní pevnost betonu, bylo zvoleno výše uvedené množství 2% z hmotnosti cementu.

Výroba zkušebních těles, kterými byly krychle o hraně 100 mm, probíhala v souladu s normou ČSN EN 12390-2 Zkoušení ztvrdlého betonu - Část 2: Výroba a ošetřování zkušebních těles pro zkoušky pevnosti. Vzorky s přísadou dusičnanu vápenatého byly ihned po výrobě uloženy do mrazicího zařízení a vystaveny cyklicky působící teplotě v rozmezí -5°C a 0°C. Záznam teplot v prvních 24 hodinách po uložení vzorků do mrazicího zařízení, tj. po prvním zmrazovacím cyklu, je zobrazen na obrázku 3. Testování probíhalo ve stáří vzorku 1, 2, 3, 7, 14 a 28 dní v souladu s normou ČSN EN 12390-3 Zkoušení ztvrdlého betonu - Část 3: Pevnost v tlaku zkušebních těles.



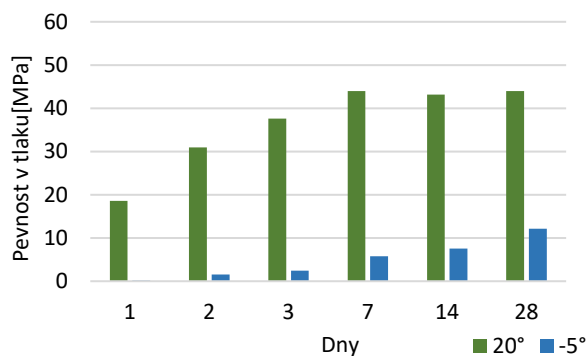
Obrázek 3 : Průběh zmrazovacího cyklu.

3. VÝSLEDKY

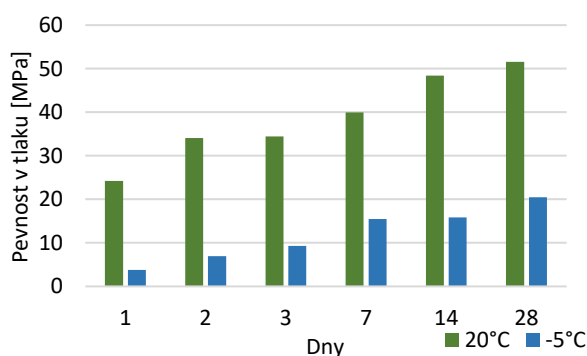
Z níže uvedených obrázků je zřejmé, že přidání dusičnanu vápenatého již v množství 2% z hmotnosti cementu pozitivně ovlivňuje hydrataci v raném stáří betonu. V obrázcích 4 a 5 jsou prezentovány průměrné hodnoty pevnosti v tlaku. Receptura obsahující dusičnan vápenatý vykazovala téměř o 100% vyšší pevnost při hydrataci během zmrazovacích cyklů

ve srovnání s betonem referenčním. Při hydrataci betonu v podmínkách laboratorních byl nárůst pevnosti zhruba 25%.

Z naměřených hodnot vyplývá pozitivní příspěvek dusičnanu vápenatého jakožto přísady umožňující hydrataci betonu i při teplotách pod obecně doporučenou hraniční 5°C.



Obrázek 4 : *Nárůst pevnosti u referenčních vzorků.*



Obrázek 5 : *Nárůst pevnosti u vzorků s dusičnanem vápenatým.*

Rovněž bylo prokázáno, že dusičnan vápenatý má pozitivní vliv konečnou pevnost betonu hydratujícího v ideálních podmínkách, avšak při vyšších množstvích dusičnanu vápenatého (5% z hmotnosti cementu a více) je vliv dusičnanu vápenatého na konečnou pevnost negativní.

4. DISKUZE

Hydratující beton, který je vystaven zmrazovacím cyklům, jehož tvorba hydratačního tepla je zvýšena o reakci dusičnanu vápenatého s trikalciíaluminátem je schopen dosáhnout zhruba dvojnásobných pevností ve srovnání s betonem bez přísady dusičnanu vápenatého. Tento výsledek není v rozporu se zahraničními studiemi, zabývajícími se obdobnou problematikou. Pro srovnání je možné uvést studii (Karagöl 2013), ve které se její autor zabývá hydratací betonu s přísadou dusičnanu vápenatého, který byl vystaven nejprve mrazu a poté hydratovat v ideálních podmínkách. Pokud bylo hydratujícímu betonu umožněno po uložení v mrazu hydratovat v ideálních podmínkách, byl beton schopný dosahovat shodných pevností až do teplot zhruba -15°C ve srovnání s betonem, který hydratovat jen v podmínkách laboratorních.

5. ZÁVĚR

Prezentovaný příspěvek se zabýval možností využití dusičnanu vápenatého, jakožto přísady umožňující hydrataci betonu i v teplotách pod bodem mrazu. Byl prokázán pozitivní vliv dusičnanu vápenatého na pevnost betonu ve srovnání s betonem referenčním, dusičnan vápenatý neobsahující. Využití dusičnanu vápenatého v optimálním množství otevírá možnost betonáže i za nižších teplot, než jsou v dnešní době obecně doporučovány. Rovněž prvotní výzkumy provedené na zahraničních pracovištích naznačují schopnost betonu obsahující dusičnan vápenatý plnohodnotně hydratovat i po uložení v mrazu až do teplot -20°C. Důležité je správně stanovit maximální prospěšné množství dusičnanu vápenatého s ohledem na dlouhodobou pevnost betonu. Dosavadní provedené studie stanovují tuto hodnotu jako 5% z hmotnosti cementu, avšak toto je vhodné ověřit na cementech běžně dostupných v ČR. Tato problematika je aktuálně předmětem výzkumu autora tohoto příspěvku.

PODĚKOVÁNÍ

Tento příspěvek vznikl za finanční podpory projektu SGS20/109/OHK1/2T/11 a SGS19/149/OHK1/3T/11.

Reference

- Ogunbode, E. B., & Hassan, I. O., 2011. Effect of Addition of Calcium Nitrate on Selected Properties of Concrete Containing Volcanic Ash. *Leonardo Electronic Journal of Practices and Technologies*. 19, 29-38. ISSN 1583-1078.
- Chikh, N., Cheikh-zouaoui, M., Aggoun, S., & Duval R.,. Effects of calcium nitrate and triisopropanolamine on the setting and strength evolution of Portland cement pastes. *Materials and Structures* [online]. 2007, 41(1), 31-36 [cit. 2020-03-03]. DOI: 10.1617/s11527-006-9215-8. ISSN 1359-5997.
- Kičaitė, A., Pundienė, I., & Skripiūnas, G.,. The influence of calcium nitrate on setting and hardening rate of Portland cement concrete at different temperatures. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* [online]. 2017, 251 [cit. 2020-03-04]. DOI: 10.1088/1757-899X/251/1/012017. ISSN 1757-8981.
- Karagöl, F., Demirboğa, R., Kaygusuz, M.A., Yadollahi, M. M. & Polat R. The influence of calcium nitrate as antifreeze admixture on the compressive strength of concrete exposed to low temperatures. *Cold Regions Science and Technology* [online]. 2013, 89, 30-35 [cit. 2020-03-05]. DOI: 10.1016/j.coldregions.2013.02.001.
- Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví. (2009), *ČSN EN 12390-2 Zkoušení ztvrdlého betonu - Část 2: Výroba a ošetřování zkušebních těles pro zkoušky pevnosti*
- Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví. (2009), *ČSN EN 12390-3 Zkoušení ztvrdlého betonu - Část 3: Pevnost v tlaku zkušebních těles*, Praha.