

Betonowanie i pielęgnacja termiczna betonu w okresie lata

1. Wprowadzenie

Kilka ostatnich sezonów letnich pokazało, że również w naszej strefie klimatycznej można spodziewać się długotrwałych, kilkutygodniowych okresów upalnych, z temperaturami znacznie przekraczającymi +25°C. Wiadomo z kolei, że takie warunki temperaturowe nie sprzyjają prawidłowej pielęgnacji betonu – znacznie trudniej utrzymać powierzchnię uformowanych elementów w stanie stale wilgotnym. Warunki upalne nie sprzyjają też wcześniejszym procesom technologicznym towarzyszącym betonowaniu. Na nie z kolei może mieć znaczący wpływ to, co dzieje się jeszcze wcześniej – w trakcie produkcji, kiedy mimochodem uzyskuje się jakąś wartość temperatury początkowej mieszanki betonowej. Co nas zatem ogranicza i jak temu zaradzić?

2. Założenia dla temperatury wbudowywanego betonu w konstrukcję

Norma betonowa PN-EN 206 [1] precyzyjnie wypowiada się tylko w zakresie minimalnej temperatury mieszanki betonowej w czasie dostawy. Nie powinna ona być niższa niż +5°C.

W innych dokumentach, jeśli określone są graniczne poziomy temperatury minimalnej lub maksymalnej dla dostarczanej mieszanki betonowej, to najczęściej podawane są w kontekście warunków temperaturowych wykonywania robót betonowych. W Ogólnych Specyfikacjach Technicznych (OST) Generalnej Dyrekcji Dróg Krajowych i Autostrad dotyczących betonu konstrukcyjnego w drogowym obiekcie inżynierskim [2] wymaga się, by temperatura mieszanki betonowej w chwili opróżniania mieszalnika nie była wyższa niż +35°C oraz nie

niższa niż +5°C. Zaleca się jednocześnie, by betonowanie konstrukcji wykonywać wyłącznie w temperaturze nie niższej niż +5°C.

Warunki określone w Ogólnych Specyfikacjach Technicznych (OST) dotyczących nawierzchni z betonu cementowego [3] narzucają konieczność ich wykonywania w temperaturze powietrza nie niższej niż +5°C i nie wyższej od +25°C (w ciągu całej doby). Dopuszczalne jest wykonywanie nawierzchni betonowej także w temperaturze powyżej +25°C. Zawsze jednak warunkiem jest, by temperatura mieszanki betonowej nie przekroczyła +30°C.

Ogólne Specyfikacje Techniczne (OST) dotyczące nawierzchni z betonu wałowanego [4] zawierają dość podobne zalecenia dotyczące minimalnej i maksymalnej temperatury wbudowywanej mieszanki betonowej, to znaczy ma ona być nie niższa niż +5°C i nie wyższa od +30°C.

Wytyczne ITB [5] podają maksymalną dopuszczalną temperaturę mieszanki betonowej, która uzależniona jest od rodzaju i klasy wytrzymałościowej zastosowanego cementu. Przedstawiono je w tab. 1. W analizie konkretnego przypadku należy uwzględnić wpływ wszystkich czynników technologicznych na możliwość jej przekroczenia – proces produkcji, warunki i czas transportu itp.

3. Założenia dla temperatury maksymalnej dojrzewającego betonu

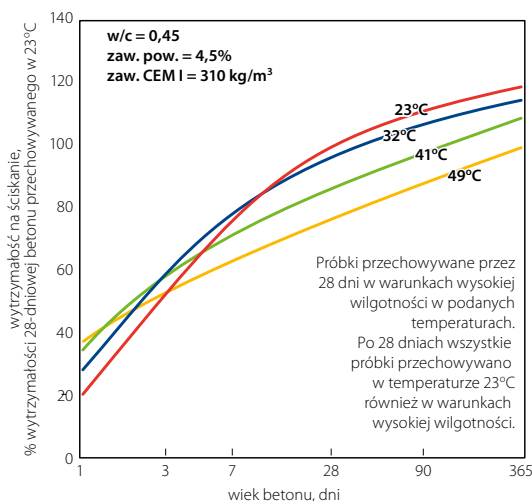
Według wymagań normy PN-EN 13670 [6] najwyższa temperatura dojrzewającego betonu wewnątrz elementu, który narażony jest na ekspozycję warunków wilgotnych lub cyklicznego zwilżania, nie powinna przekraczać 70°C. Norma zastrzega przy tym, że może ona być wyższa, jeśli wykaże się, że przy zastosowanych składnikach nie będzie miała znacząco szkodliwego wpływu na właściwości betonu. Dopuszcza także, że dla danego rozwiązania projektowego może być zdefiniowana niższa temperatura maksymalna niż 70°C. W komentarzu do tych zaleceń znajduje się uzasadnienie konieczności ograniczenia temperatury maksymalnej – jeżeli beton jest narażony na działanie wysokiej temperatury przez pewien czas w jego początkowym okresie dojrzewania, może dojść do powstawania wtórnego etryngitu, w zależności od wilgotności i składu mieszanki betonowej (zawartość alkaliów, skład chemiczny cementu, stosowanie dodatków itp.).

Negatywne skutki zbyt wysokiej temperatury dojrzewającego betonu objawiają się zasadniczo w dwóch postaciach [7]. Pierwsza – to uszkodzona mikrostruktura betonu, czyli mikrozarzysowania wewnętrzne powodowane przez zróżnicowaną rozszerzalność składników. Druga natomiast to zmniejszenie stopnia hydratacji cementu (spoiwa) w późniejszym okresie dojrzewania, w porównaniu z takim samym betonem dojrzewającym w warunkach normalnych. Dają one w zasadzie jeden

Tablica 1. Maksymalna dopuszczalna temperatura mieszanki betonowej [5]

Rodzaj cementu	Maksymalna temperatura mieszanki betonowej T_b [°C]
CEM I, CEM II/A 42,5	30
CEM I, CEM II/A 32,5	40
CEM II/B, CEM III 32,5	45

Rys. 1. Wpływ podwyższonej temperatury dojrzewającego betonu na jego wytrzymałość końcową [8]



wspólny negatywny efekt – zmniejszają wytrzymałość końcową betonu (rys. 1).

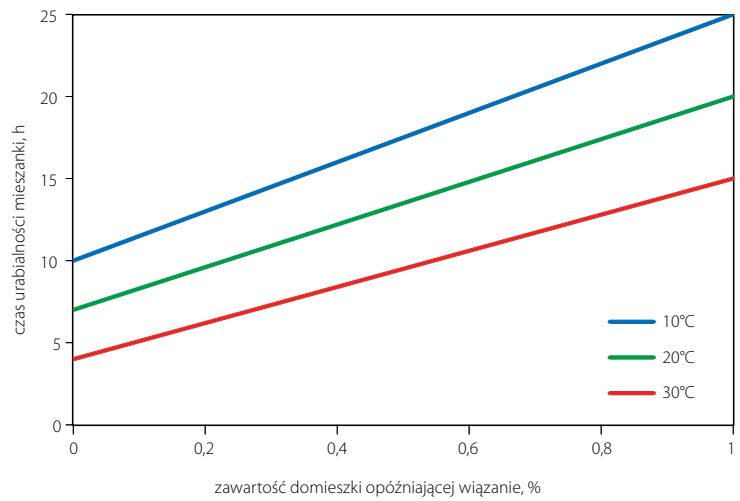
Analizując podane w dokumentach normalizacyjnych lub wytycznych wymogi czy informacje dotyczące maksymalnej temperatury dojrzewającego betonu, widzimy, że mają one zasadniczo „miękki” charakter i nigdzie nie stosuje się rygorystycznego ich brzmienia. Jeśli już podane są konkretne wartości, to towarzyszy im komentarz, że badania i doświadczenia mogą potwierdzić możliwość ich nierepektowania. Najczęściej nie niosą one bowiem tak negatywnych skutków dla struktury betonu, czy dla całej uformowanej konstrukcji, jak przemrożenie betonu lub wywołanie zbyt dużych różnic (gradientów) temperatur w dojrzewającym elemencie.

4. Wpływ temperatury mieszanki betonowej na czas jej przerobu

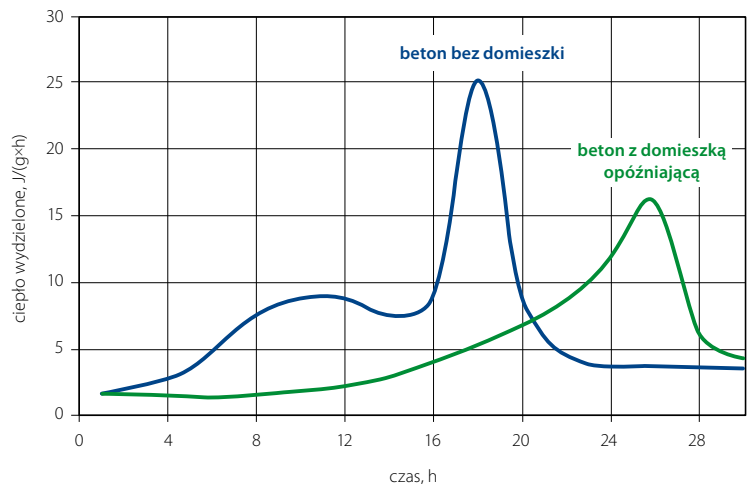
Dużym zagrożeniem dla betonowania w okresie upalnym przy wzroście temperatury mieszanki betonowej jest skrócenie możliwego czasu jej przerabiania bez negatywnych skutków dla tworzenia wytrzymałej i trwałej struktury stwardniałego betonu. W normie PN-B-06265 [9] zalecono, by całkowity rozładunek betoniarek samochodowych nastąpił w czasie nie dłuższym niż 90 minut, licząc od chwili pierwszego kontaktu wody z cementem w ramach produkcji danego zarobu/ladunku. Warunek ten dotyczy zachowania właściwości mieszanki betonowej w temperaturze odniesienia, czyli laboratoryjnej (+20°C). Im wyższa temperatura, tym trzeba to zrobić szybciej. Niestety, nie istnieją (i nigdy nie będą opracowane!) ogólne charakterystyki pokazujące relację pomiędzy temperaturą mieszanki betonowej a skróceniem czasu jej przerobu. Jest to zależność indywidualna dla każdej receptury betonu – bo zależy również od wszelakich interakcji pomiędzy wszystkimi składnikami mieszanki betonowej (cementem, kruszywem, domieszkami chemicznymi, dodatkami, wodą).

W takim przypadku, zagrożenia skróceniem czasu przerobu mieszanki (a nie wiadomo o ile), najlepszym rozwiązaniem jest zastosowanie domieszki opóźniającej, która ten czas przywróci lub też może go wydłużyć do praktycznie dowolnego oczekiwanego okresu technologicznego – nawet do kilkunastu godzin lub więcej (rys. 2). Ale – dla przypomnienia – możliwe to jest tylko w zakresie maksymalnej dopuszczalnej temperatury mieszanki betonowej (tab. 1). Korzystnym efektem użycia domieszki opóźniającej jest dodatkowo rozłożenie w dłuższym czasie wydzielania ciepła wyzwalanego podczas hydratacji cementu (rys. 3).

Zastosowanie domieszki opóźniającej (w tym – jej ilości) musi być poparte argumentacją technologiczną. To znaczy – dobór na podstawie sprawdzonej kompatybilności z innymi domieszkami (najlepiej gdy pochodzą z jednego typoszeregu od jednego producenta potwierdzającego taką kompatybilność) oraz sprawdzonej kompatybilności z pozostałymi składnikami mieszanki – cementem, dodatkami (także potwierdzonymi wcześniejszymi doświadczeniami ze stosowaniem takich kombinacji materiałowych). No i w końcu – potwierdzenie próbą technologiczną dla takiego zestawu materiałowego – zarówno w skali mikro – w laboratorium na zarobie próbnym, jak i w skali makro – w ramach próbnych zarobów na węźle betoniarskim.

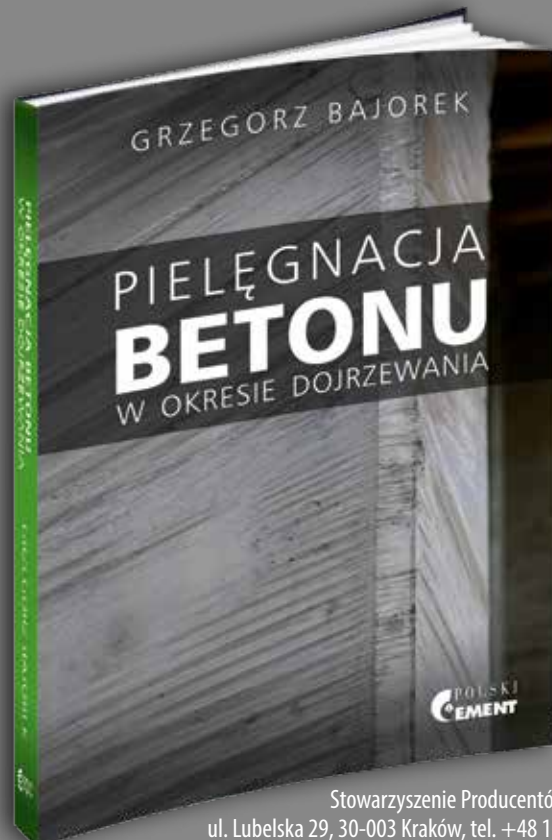


Rys. 2 Wydłużenie czasu przerobu mieszanki betonowej przy użyciu domieszki opóźniającej [8]



Rys. 3 Przesunięcie w czasie wydzielania ciepła w dojrzewającym betonzie z domieszką opóźniającą [8]

ZAPOWIEDŹ WYDAWNICZA



Książka w przygotowaniu

Wydawca:

Stowarzyszenie Producentów Cementu
ul. Lubelska 29, 30-003 Kraków, tel. +48 12 423 33 55
e-mail: wydawnictwo@polskicement.pl, www.polskicement.pl

Pewnym rozwiązaniem problemów krótkiego czasu przerobu mieszanki betonowej o temperaturze wyższej niż +25°C może być zastosowanie technologii produkcji betonu towarowego polegającej na dodawaniu wody zarobowej do wymieszanych i dowiezionych na sucho składników na miejsce dostawy. Opóźnia się tym sposobem moment, od którego zaczyna się odliczać czas przerobu mieszanki. Metoda ta stosowana jest dość powszechnie w krajach Europy Południowej, ale wymaga innych urządzeń mieszająco-dozujących węzła betoniarskiego oraz innych betonomieszarek samochodowych o specjalnym kształcie mieszalnika i wyższych jego obrotach.

5. Możliwości sterowania temperaturą mieszanki betonowej

Drugim ważnym aspektem betonowania i pielęgnacji betonu w okresie upalnym jest możliwość zapewnienia temperatury początkowej betonu wbudowanego T_{bp} , którą można utożsamiać z maksymalną dopuszczalną temperaturą mieszanki betonowej określoną w tab. 1. Należy ją traktować jako temperaturę mieszanki betonowej, aż do chwili ostatecznych czynności technologicznych związanych z jej wbudowywaniem, czyli do momentu wykańczania powierzchni.

Jeśli tak, to trzeba określić maksymalną dopuszczalną temperaturę mieszanki betonowej T_b w trakcie dostawy, a także tę wcześniejszą uzyskiwaną na końcu procesu mieszania i załadunku do środka transportu. Trzeba uwzględnić zyski ciepła w trakcie czynności związanych z wbudowywaniem mieszanki, jej zagęszczaniem i wykańczaniem. Wcześniej – przeładunków i transportu mieszanki w obrębie budowy i nagrzewania się od rozgranego deskowania i zbrojenia. Jeszcze wcześniej – czasu i sposobu transportu mieszanki z węzła betoniarskiego do miejsca dostawy.

Nie można jednak pominąć w tych analizach jednego ważnego aspektu związanego z kolorystyką (w tym przezroczystością) osłon ochronnych i samego sprzętu (np. bębna betonomieszarki samochodowej). Istotne są bowiem zyski ciepła od pochłaniania promieniowania słonecznego – elementy w ciemnych kolorach mogą osiągnąć temperatury powierzchniowe nawet o kilkadziesiąt stopni wyższe od tych wybarwionych w jasnej kolorystyce, lub odbijającej promienie. Dotyczyć to może – folii zabezpieczających (bardzo popularna czarna budowlana lub przezroczysta), bębnow betonomieszarek, zbiorników na wodę, orurowania pompy do betonu, koszy zasypowych, poszycia deskowania itp.

W przypadku elementów wyeksponowanych na nasłonecznienie przykrycie betonu folią przezroczystą może spowodować, że jego powierzchnia osiągnie temperaturę o 25°C wyższą od otaczającego powietrza. Efekt czarnej folii to dodatkowe 15°C w porównaniu z folią przezroczystą, lub 20°C w porównaniu z folią białą [10]. Efekty te odzwierciedlają uregulowania amerykańskie, w których zaleca się, aby różnica temperatur pomiędzy powierzchnią dojrzewającego betonu a jego wnętrzem na głębokości 50 mm nie przekraczała 13°C [11, 12].

Pozostaje najważniejszy aspekt do rozwiązania – wyprodukowanie mieszanki betonowej o oczekiwanej temperaturze nie większej od maksymalnej dopuszczalnej temperatury (wyliczonej na pod-

stawie wyżej przedstawionych analiz związanych z dalszym dogrzewaniem mieszanki w trakcie transportu i zabudowy). Wykorzystując poniższy wzór, przedstawiający bilans cieplny, można wyliczyć temperaturę mieszanki po zakończeniu procesu mieszania:

$$T_{bw} = \frac{0,22(T_s \cdot W_s + T_a \cdot W_a + T_c \cdot W_c) + T_w \cdot W_w + T_s \cdot W_{ws} + T_a \cdot W_{wa}}{0,22(W_s + W_a + W_c) + W_w + W_{wa} + W_{ws}}$$

w którym:

T_{bw} – temperatura końcowa mieszanki betonowej na węźle betoniarskim [°C]

T_c – temperatura cementu [°C]

T_s – temperatura kruszywa drobnego [°C]

T_a – temperatura kruszywa grubego [°C]

T_w – temperatura wody zarobowej [°C]

W_c – masa cementu [kg]

W_s – masa nasyczonego powierzchniowo suchego kruszywa drobnego [kg]

W_a – masa nasyczonego powierzchniowo suchego kruszywa grubego [kg]

W_w – masa wody zarobowej [kg]

W_{ws} – masa wolnej wody w drobnym kruszywie [kg]

W_{wa} – masa wolnej wody w grubym kruszywie [kg]

Aby wyliczona temperatura T_{bw} nie była większa od maksymalnej dopuszczalnej na węźle betoniarskim, trzeba zapewnić przede wszystkim odpowiedni poziom temperatury składników wyjściowych mieszanki betonowej. Dopiero jeśli nie da się tego zrealizować w taki sposób (stosunkowo mało kosztowny), jest możliwość sięgnięcia po drugie rozwiązanie polegające na sztucznym, wymuszonym schładzaniu składników, bądź schładzaniu samej mieszanki betonowej (niestety kosztowne i wymagające dodatkowego wyposażenia węzła produkcyjnego w odpowiednie instalacje).

W warunkach krajowych, z uwagi na doświadczenia klimatyczne, zabiegi ogranicza się do sposobu pierwszego. Największy wpływ można mieć, na szczęście, na kształtowanie temperatury głównego ilościowo składnika betonu, czyli kruszywa. Zważając na prognozy pogody, przygotowane w pryzmach zapasy kruszywa można zabezpieczyć przed nadmiernym nagrzewaniem, nakrywając materiałem odbijającym promieniowanie słoneczne (najlepsze – jasne włókniny, bo przy tym przewiewne, gorsze, ale przydatne folie przezroczyste, niebarwione). Można dodatkowo zraszać na bieżąco wodą. Oczywiście, najmniejszy problem z właściwą temperaturą kruszyw jest w zamkniętych zadaszonych magazynach.

Kłopotliwym składnikiem z punktu widzenia utrzymania stosunkowo niskiej temperatury jest cement. Dlaczego?... – bo nie ma prostej metody, by go schłodzić, a dostarczany w okresie letnim jest przeważnie ciepły, a nawet gorący (nawet na poziomie 70÷80°C i więcej). Wynika to z dużej podaży cementu w okresie letnim (szczyt sezonu budowlanego), a wprost, z technologii wytwarzania cementu, który w trakcie mielenia uzyskuje dość wysokie temperatury. Z uwagi na mocno porowatą strukturę luźno usypanego materiału, jego studzenie jest bardzo wolne i nie nadaje ono za tempem opróżniania silosów magazynowych cementowni. Gorący cement jest istotnym zagrożeniem technologicznym, gdyż może wywoływać nieprzewidziane

skutki na reologię mieszanki betonowej. Pewnym sposobem jest gromadzenie go w silosach przed nocą, co może skutkować schładzaniem do następnego dnia roboczego.

Ważnym składnikiem betonu mającym wpływ na regulowanie temperatury mieszanki betonowej jest jeszcze woda. O ile w okresie zimowym jest łatwa technologicznie do podgrzania (nawet o kilkadziesiąt °C), o tyle w okresie letnim potrzebna by była wysokowydajna instalacja chłodząca, a samo schłodzenie wody dałoby tylko wartość rzędu kilkunastu °C.

W miejsce takiego rozwiązania można stosować dozowanie lodu zamiast ochłodzonej wody, a to daje znacząco lepszy efekt z uwagi na różnicę ciepła właściwego wody/lodu (4,19/2,09 kJ/(kg·K) w stosunku do ciepła topnienia lodu (334,72 kJ/kg). Aby takie działanie miało uzasadnienie technologiczne, zastosowany powinien być lód w postaci mocno rozdrobnionej, który w łatwy i szybki sposób zostanie rozproszony w masie mieszanki betonowej i równomiernie odda ciepło przemiany fazowej. Taką postać lodu można uzyskać w wytwornicach lodu tuskowego lub w rozdrabniarkach bloków lodowych (fot. 1). W analizach możliwości stosowania tej metody trzeba rozważyć też wielkość produkcji węzła betoniarskiego, która będzie podlegać schładzaniu, aby prawidłowo dobrać wydajność urządzenia wytwarzającego lód [13].

Drugim czynnikiem, który realnie można wykorzystać do schładzania wytwarzanej na węźle betoniarskim mieszanki, jest zastosowanie ciekłego azotu (fot. 2). Efektywność tej metody można także wyliczyć, znając właściwości cieplne azotu – ciepło parowania azotu (200,0 kJ/kg) oraz ciepło właściwe gazowego azotu (1,04 kJ/kg·K (0,029 kJ/mol·K)). Przy różnicy temperatur 220°C ogrzanie się odparowywanego 1 kg azotu odbiera z mieszanki kolejne 228,8 kJ. Czyli każdy 1 kg ciekłego azotu odbiera ok. 430 kJ ciepła z mieszanki betonowej. Stosowanie tej metody polega z reguły na wprowadzaniu czynnika schładzającego do wnętrza wypełnionego mieszanką betonową bębna betonomieszarki samochodowej [13].

Obydwie przedstawione metody schładzania (zastosowanie lodu bądź zastosowanie ciekłego azotu) są z powodzeniem i nawet dość powszechnie stosowane w krajach o stałym gorącym klimacie. Dopracowano się tam odpowiednio wydajnych urządzeń w stosunku do zapotrzebowania węzła betoniarskiego. W Polsce takie rozwiązania pozostają na razie w sferze teoretycznej, i nie znajdują uzasadnienia ekonomicznego. Trudno sobie nawet wyobrazić instalację chłodzącą przy ciągłej produkcji węzła, na przykład przy betonowaniu konstrukcji maszynowych [16].

6. Pielęgnacja w okresie upalnym

W pielęgnacji termicznej okresu upalnego trzeba zwracać przede wszystkim uwagę, by nie dopuścić do powstawania zbyt dużych gradientów temperaturowych w różnych częściach dojrzewającego elementu – np. wskutek częściowego zacienienia lub nierównomiernej ekspozycji na promieniowanie słoneczne, albo niewłaściwego zastosowania materiału ochronnego.

Na pewno w warunkach upalnych trudniejsza do prowadzenia jest pielęgnacja wilgotnościowa [17].



Fot. 1. Urządzenie do rozdrabniania brył lodu i do dozowania bezpośredniego do bębna betonomieszarki samochodowej [14]



Fot. 2. Urządzenie do schładzania mieszanki betonowej ciekłym azotem bezpośrednio w bębnie betonomieszarki samochodowej [15]

Wyższe temperatury intensyfikują odparowywanie wody i ułatwiają przesuszanie powierzchni. Dlatego, dobierając środki ochrony, trzeba brać pod uwagę obydwaj aspekty pielęgnacji – jednocześnie użycie materiału magazynującego wodę (np. włóknina) i materiału odcinającego możliwość odparowywania (np. folia). Należy unikać, o czym wspomniano już wcześniej, ciemnej kolorystyki tych materiałów, by zminimalizować pochłanianie energii promieniowania słonecznego.

dr inż. Grzegorz Bajorek
Politechnika Rzeszowska
Centrum Technologiczne Budownictwa
przy Politechnice Rzeszowskiej

Literatura

- 1 PN-EN 206+A1:2016-12 Beton. Wymagania, właściwości, produkcja i zgodność
- 2 Ogólne Specyfikacje Techniczne (OST M-13.01.00) Generalnej Dyrekcji Dróg Krajowych i Autostrad dotyczące betonu konstrukcyjnego w drogowym obiekcie inżynierskim, 2014
- 3 Ogólne Specyfikacje Techniczne (OST 06.01) Generalnej Dyrekcji Dróg Krajowych i Autostrad dotyczące nawierzchni z betonu cementowego, 2014
- 4 Ogólne Specyfikacje Techniczne (OST 06.02) Generalnej Dyrekcji Dróg Krajowych i Autostrad dotyczące nawierzchni z betonu wałowanego, 2014
- 5 Wykonywanie robót budowlanych w okresie obniżonej temperatury. Wytyczne, Instytut Techniki Budowlanej, Warszawa 2011
- 6 PN-EN 13670:2011 Wykonywanie konstrukcji betonowych
- 7 Kurdowski W., Chemia cementu i betonu, Stowarzyszenie Producentów Cementu Kraków 2010, Wydawnictwo Naukowe PWN Warszawa 2010
- 8 Gierczynski Z. i in., Vademecum Technologa Betonu, Wydawnictwo Cement Górażdże SA, Chorula 2016
- 9 PN-B-06265:2017 Krajowe uzupełnienie PN-EN 206+A1:2016-12 Beton. Wymagania, właściwości, produkcja i zgodność
- 10 Orłowski Z., Podstawy technologii betonowego budownictwa monolitycznego, Wydawnictwa Naukowe PWN, Warszawa 2010
- 11 Guide for Curing of Portland Cement Concrete Pavements, Volume I, Publication No FHWA-RD-02-099, January 2005
- 12 Guide for Curing of Portland Cement Concrete Pavements, Volume II, Publication No FHWA-HRT-05-038, January 2006
- 13 ACI 305R-99 Hot Weather Concreting
- 14 RMCAO Technical Specifications, Hot Weather Concrete, Ready Mix Concrete Association of Ontario, 2010
- 15 Kosmatka S.H., Kerkhoff B., Panarese W.C., Design and Control of Concrete Mixtures, Portland Cement Association 2003
- 16 Bajorek G., Kiernia-Hnat M., Rola nadzoru przy wykonywaniu maszynowych konstrukcji betonowych, IX Konferencja „Dni Betonu – Tradycja i Nowoczesność” Wista 10-12 października 2016, Monografie Technologii Betonu, tom 1
- 17 Bajorek G., Lato – czas szczególnej pielęgnacji betonu, „Budownictwo, Technologie, Architektura” 3/2008, s. 50-52