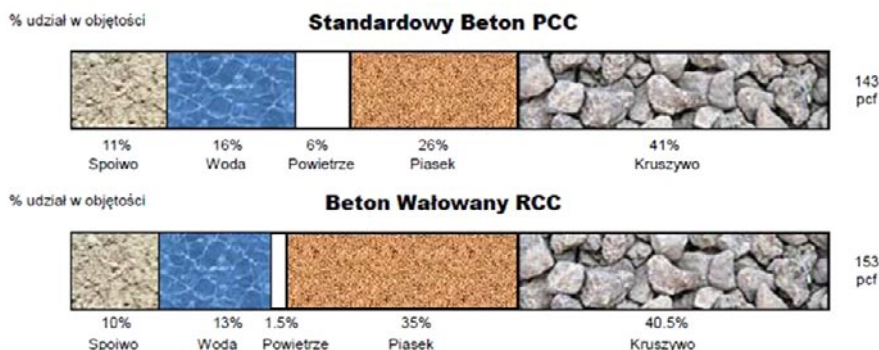




inż. **Beata Stankiewicz**, Politechnika Opolska, mgr inż. **Paweł Staboński**, Labor Aquila

Trwałość betonu wałowanego w konstrukcjach drogowych

Technologia betonu wałowanego i wibrowałowanego jest szeroko stosowana w wykonawstwie nawierzchni betonowych w Stanach Zjednoczonych i Kanadzie, ale także w krajach Europy Zachodniej. Stosowana jest głównie do budowy dróg lokalnych (low speed roads), placów postojowych i manewrowych, nabrzeży portowych, lotnisk. W wielu krajach (w tym szczególnie w dalekowschodniej Azji) stosowana jest również w wykonawstwie wielkich obiektów hydrotechnicznych. Oprócz wielu publikacji z badań nad betonem RCC (Roller Compacted Concrete) dostępne są też ogólnoamerykańskie wytyczne opracowane przez Portland Cement Association (2004, 2005, 2006), American Concrete Institute (1995, 2000) i US Army Corps of Engineers (1995).



Rys. 1. Orientacyjne porównanie mieszanki betonowej dla betonu drogowego lanego i wałowanego [4], [9]



Rys. 3. Wbudowanie warstwy RCC za pomocy rozścielacza do asfaltu [9]

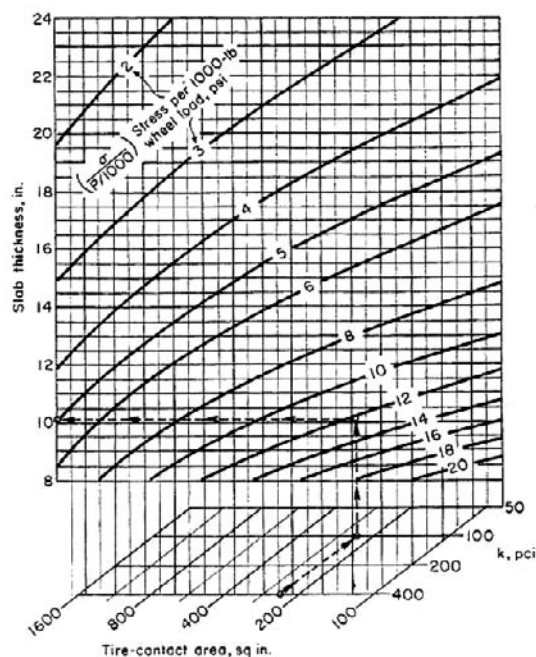
Główne zalecenia do projektowania betonu wałowanego są następujące:

- ilość cementu powinna wynosić od 11 do 17% suchej masy kruszywa i spoiwa;
- maksymalny wymiar ziaren kruszywa nie powinien przekraczać 20 mm;
- ilość ziaren kruszywa mniejszych od 0,075 mm powinna wynosić od 2 do 8%;
- ilość wody i stosunek w/c powinien być tak dobrany, by mieszanka betonu wałowanego była urabialna i podatna na zagęszczenie przez wałowanie (próba według zmodyfikowanej metody Proctora i weryfikacja w skali technicznej) [9].

Na rys. 1 zobrazowano orientacyjne porównanie procentowego udziału komponentów mieszanki betonowej w betonie konwencjonalnym i wałowanym. Aby zapewnić mieszance betonowej RCC odpowiednie zagęszczenie, musi ona być odpowiednio sucha, żeby utrzymać jeżdżące po niej 8-tonowe walce drogowe. Jednocześnie musi być wystarczająco mokra, żeby umożliwić równomierny rozkład zaczynu/pasty przez objętość kruszywa w trakcie zagęszczania. W Polsce beton wałowany stosowany jest w warstwach podbudowy dróg, a także jako warstwa ścieralna w konstrukcjach dróg lokalnych, o niskich kategoriach ruchu (KR1, KR2). Ważnym parametrem technicznym jest trwałość warstwy ścieralnej związanej z mrozoodpornością oraz odpornością płyty z betonu wałowanego na wypiętrzenia. Trwałość ta jest ściśle związana z prawidłowym skomponowaniem składników mieszanki betonowej, doborem właściwej grubości warstwy RCC oraz przestrzeganiem precyzyjnego reżimu technologicznego w budowaniu i dogęszczeniu warstwy drogowej.

Prawidłowa grubość warstwy z betonu wałowanego

Grubość warstwy nawierzchni betonowej, zarówno konwencjonalnego betonu lanego, jak również betonu RCC, projektowana jest tak, aby stosunek naprężeń wywołanych zginaniem i zmęczeniem betonu spowodowanym ciągłym naciskiem osi samochodów ciężarowych utrzymać w odpowiednich granicach. Na naprężenia i zniszczenie zmęczeniowe największy wpływ ma rozłożenie nacisku wzdłuż krawędzi betonu, a także w miejscu łączeń/dylatacji. Zdecydowanie mniejszy wpływ na wytrzymałość betonu ma nacisk w środkowej części powierzchni nawierzchni betonowej. Mieszanka betonowa RCC jest mniej podatna na segregację podczas trans-



Rys. 2. Nomogram do wyznaczania grubości RCC wg Portland Cement Association [5]

portu i w budowaniu, gdy zwiększy się udział kruszyw drobnych w stosie okruszowym w porównaniu do rekomendowanej zawartości kruszywa drobnego w tradycyjnej mieszance betonowej (np. w technologii betonu lanego). W celu zapewnienia gładkiej i zamkniętej powierzchni zewnętrznej zalecane jest, aby udział frakcji pyłastej w stosie okruszowym projektowanej mieszanki betonowej (frakcja przechodząca przez sito o rozmiarze oczka 0,074 mm) zawierała się w przedziale 5-10% [6]. Natomiast wcześniejsze publikacje amerykańskie [8] oraz przyjęte w Polsce [7] rekomendują zawartość frakcji pyłastej na poziomie 2-8%. Zwiększenie udziału w mieszance betonowej RCC drobnych frakcji prowadzi do zwiększenia ilości wody zarobowej w celu utrzymania konsystencji mieszanki w zakresie urabialności. Badania dowiodły, że zwiększenie ilości wody zarobowej nie wpływa znacząco na wytrzymałość badanych próbek na ściskanie [5]. Wytrzymałość mechaniczna betonu RCC wzrasta wraz z rosnącym udziałem drobnych frakcji w mieszance betonowej, niską wartością wskaźnika w/c, a przede wszystkim wysokim stopniem zagęszczenia w budowanej mieszance. W literaturze wskazuje się na istotne ograniczenia w projekto-

Maksymalna średnica ziaren kruszywa	Zwartość powietrza (% obj.) w mieszance betonowej			
	bez domieszki upłynniającej lub uplastyczniającej		z domieszką upłynniająca lub uplastyczniającą	
mm	średnia dzienna	minimalna	średnia dzienna	minimalna
8	5,5	5,0	6,5	6,0
16	4,5	4,0	5,5	5,0
31,5	4,0	3,5	5,0	4,5

Tab. 1. Zalecana zawartość powietrza w mieszance betonowej

► waniu grubości pojedynczej warstwy mieszanki betonowej RCC do wbudowania [6]. Limity te służą zapewnieniu odpowiedniego zagęszczenia dolnej warstwy mieszanki betonowej RCC, ponieważ to stopień zagęszczenia oraz dokładność jego wykonania stanowią istotę wytrzymałości nawierzchni wykonanej w technologii betonu wałowanego. Jeśli projekt przewiduje grubszą warstwę nawierzchni ścieralnej, mieszanka wbudowywana jest warstwami po 20 cm z zachowaniem odpowiednich rygorów technologicznych (głównie czas pomiędzy zagęszczaniem poszczególnych warstw mieszanki betonowej). W literaturze amerykańskiej istnieje kilka metod wyznaczania odpowiedniej grubości nawierzchni betonowej RCC, opracowanych przez Portland Cement Association, American Concrete Institute i US Army Corps of Engineers. Metoda opracowana przez Portland Cement Association [5] oparta jest na procedurze wyznaczania grubości płyty betonowej RCC i stosuje się ją głównie do aplikacji przemysłowych (place magazynowe i manewrowe), lecz z powodzeniem można również korzystać z niej podczas projektowania dróg o niewielkim natężeniu ruchu. Procedura bazuje na nacisku na wewnętrzną część płyty i wykorzystuje związki pomiędzy grubością nawierzchni i właściwościami zmęczeniowymi betonu. Metoda ta jest zbliżona do procedur wyznaczania grubości nawierzchni dla betonu lanego. Aby wyznaczyć grubość nawierzchni w danym przypadku, należy zapewnić dostęp do następujących informacji:

- współczynnika reakcji podłoża k (*supporting strenght of subgrade and subbase*);
- nacisku jednego koła na powierzchnię (*wheel loads*);
- odległości pomiędzy kołami (*wheel spacing*);
- rodzaju opony (*tire characteristics*);
- współczynnika projektowego kategorii ruchu (*traffic index design*);
- wytrzymałości betonu na zginanie (*flexural strenght*);
- modułu sprężystości betonu (*modulus of elasticity*).

Dysponując tymi informacjami, można wyznaczyć zalecaną grubość nawierzchni betonowej RCC. Nomogram przedstawiono na rys. 2.

Wszystkie amerykańskie metody wyznaczania grubości nawierzchni betonowej doczekały się wersji cyfrowych, tzn. dostępne są programy komputerowe, które na podstawie wprowadzonych danych pozwalają z dużą dokładnością określić wymagane parametry betonu RCC. Przykładami takich programów są:

- RCC-PAVE bazujący na procedurze Portland Cement Association;
- PCASE, oparty na procedurze U.S. Army Corps of Engineers;
- StreetPave, autorstwa American Concrete Pavement Association.



Rys. 4. Cykliczne zagęszczanie warstwy z betonu wałowanego [9]

Spełnienie wymaganego reżimu technologicznego wykonawstwa

Wbudowywanie betonu wałowanego odbywa się za pomocą tradycyjnego sprzętu do wykonywania nawierzchni asfaltowych. Rozkłada się go za pomocą ciężkich rozkładarek do asfaltu (rozścielaczy) (rys. 3), a zagęszcza walcami wibracyjnymi o masie powyżej 8000 kg. Stosowane przez wykonawców rozścielacze do mieszanki betonowej RCC pozwalają rozkładać warstwy mieszanki betonowej RCC o grubości maksymalnie 25 cm przed zagęszczeniem. Po zagęszczeniu walcami maksymalna grubość uzyskanej warstwy wynosi zwykle ok. 20-21 cm, czyli zgodnie z wymaganiami technicznymi, mówiącymi o konieczności dogęszczenia spodniej strefy warstwy RCC.

Beton wałowany musi charakteryzować się optymalną wilgotnością mieszanki przy rozkładaniu. W przypadku zbyt suchej mieszanki nie uzyska on właściwego wskaźnika zagęszczenia, a w przypadku zbyt plastycznej mieszanki nie wytrzyma nacisku walców podczas zagęszczania. Operacje transportu, wbudowania i zagęszczenia należy tak zsynchronizować, by beton wałowany został ułożony i zagęszczony najpóźniej w ciągu 90 minut od zmieszania składników, chyba że podjęto odpowiednie działania technologiczne, opóźniające proces wiązania cementu w mieszance betonowej (np. przez zastosowanie domieszek opóźniających początek wiązania cementu). W czasie realizacji konstrukcji drogowej z udziałem betonu wałowanego powinno się stosować próbny odcinek technologiczny i sprawdzić, ile należy zastosować cykli dogęszczenia (rys. 4) [9], czyli przejazdów walców stalowych (ewentualnie walców stalowych z wibrowaniem oraz walców ogumowanych), aby uzyskać pożądaną grubość dogęszczenia warstwy betonowej charakteryzującej się pożądanym wskaźnikiem zagęszczenia o wartości 0,98 na całej grubości. Uzyskanie jednolitej powierzchni warstwy o stałej grubości, wykazującej jednorodny, właściwy wskaźnik zagęszczenia jest czynnikiem determinującym późniejszą trwałość konstrukcji drogowej.

Komponenty mieszanki RCC w aspekcie trwałości konstrukcji drogowej

Generalna Dyrekcja Dróg Krajowych i Autostrad opublikowała w 2013 r. [7] ogólną specyfikację techniczną stanowiącą (OST) jako obowiązującą podstawę sporządzenia specyfikacji technicznej wykonania i odbioru robót budowlanych (STWiORB), przy zleceniu i realizacji robót na drogach krajowych. Jest również zalecana do wykorzystania przy zleceniu robót na drogach wojewódzkich, powiatowych i gminnych w odniesieniu do dróg wykonanych techniką betonu wałowanego. Zgodnie z zaleceniami OST w technologii RCC można wykonywać:

- nawierzchnie nienarażone na działanie opadów atmosferycznych oraz soli odladzających - umiarkowanie eksploatowane (jak np. place składowe pod wiatą) - z betonu klasy minimum C20/25,
- nawierzchnie dróg kategorii ruchu KR1-KR2 - z betonu klasy minimum C25/30,
- nawierzchnie dróg technicznych (dojazdowych, objazdowych czy serwisowych), dróg wewnętrznych, placów manewrowych itp. (o obciążeniu odpowiadającym kategoriom ruchu KR3-KR4 na drogach krajowych) - z betonu klasy minimum C30/37,
- podbudowy dróg kategorii ruchu KR1-KR7 - zgodnie z wytycznymi WT5 [7].

Do mieszanek betonowych przeznaczonych do wykonywania nawierzchni w technologii betonu wałowanego stosuje się kruszywa naturalne, jak żwir i piasek naturalny, lub łamane, jak grys, i/lub sztuczne - z recyklingu - kruszywa mineralne. Kruszywa muszą być zgodne z wymaganiami zawartymi w normie PN-EN 12620 oraz gwarantować uzyskanie uzgodnionych parametrów trwałościowych betonu. Domieszki powinny być zgodne z normą PN-EN 934-2. Domieszki plastyfikujące zmniejszają wodożądność składników betonu oraz poprawiają urabialność betonu przy zmniejszonym dozowaniu wody lub zmniejszonej ilości cementu. Domieszki upłynniające - superplastyfikatory - mają działanie uplastyczniające w znacznie silniejszym zakresie niż domieszki plastyfikujące. Stosowane są przede wszystkim do produkcji betonu drogowego o szybkim narastaniu wczesnej wytrzymałości, jaką charakteryzuje się beton wałowany. Trwałość działania domieszek upłynniających waha się w granicach od 30 do 60 minut. W szczególnych przypadkach wymagane jest stosowanie domieszek opóźniających. Służą one do wydłużenia czasu przerabialności betonu, opóźnienia początku wiązania cementu w warunkach wysokich temperatur. Wszelkie domieszki stosowane do betonu przeznaczonego do wykonywania nawierzchni drogowych mogą być używane po wykonaniu odpowiednich prób i uzyskaniu wymaganych parametrów betonu w badaniach laboratoryjnych. Do betonu wałowanego nadają się dodatki typu I lub typu II. Uzupełniają one frakcje drobne < 0,25 mm. Pomagają wspólnie uzyskać odpowiedni stopień zagęszczenia mieszanki betonowej w układanej warstwie oraz zamknięcie powierzchni betonu. Zaleca się używać następujących dodatków:

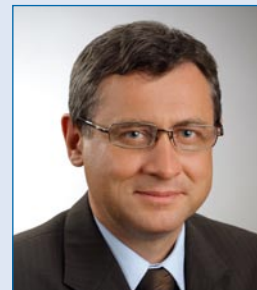
- popiół lotny krzemionkowy - wg normy PN-EN 450-1:2012,
- pył krzemionkowy - wg normy PN-EN 13263-1 + A1,
- mielony granulowany żużel wielkopieczowy - wg normy PN-EN 15167-1:2007.

Efekt wypętniania, będący wynikiem bardzo małej wielkości cząsteczek mikrokrzemionki, powoduje wyparcie wody z pustych przestrzeni, która może zostać ponownie wykorzystana przez świeżą mieszankę betonową. Oznacza to, że mikrokrzemionka dodana w ilości mniejszej niż 3% cementu powoduje uwolnienie wody zawartej w szczelinach przynajmniej w takiej samej ilości, jaka zbiera się na powierzchni [1].

W przeciwieństwie do tradycyjnego betonu lanego dodatki napowietrzające nie są szeroko stosowane w mieszankach betonowych RCC. Główną tego przyczyną jest konsystencja mieszanki betonowej odpowiadająca zerowemu opadowi stożka Abramsa.

Nawierzchnie drogowe z betonu wałowanego stają się w Polsce coraz popularniejsze. Świadczą o tym częściej ogłaszane przetargi, gdzie nawierzchnia z betonu wałowanego występuje jako alternatywa do wariantu asfaltowego lub nawet jako nawierzchnia preferowana. Zarządcy dróg lokalnych coraz śmielej sięgają po to rozwiązanie. I mają swoje powody. Nawierzchnia z betonu wałowanego jest porównywalna z asfaltem pod kątem kosztu wykonania (może być nawet nieco tańsza), ale trwałością znacznie go przewyższa. Prawidłowo wykonana nawierzchnia betonowa powinna wytrzymać bez większych remontów 30 i więcej lat.

Sylwester Gruszczyński, Lafarge



Wytworzenie się w mieszance betonowej pęcherzyków powietrza jest możliwe tylko w przypadku wystarczającej ilości wody zarobowej. Aby dodatek napowietrzający był efektywny, potrzebuje na tyle wody, aby pokryć cienką warstwą każdy pęcherzyk. Badania wykazały, że w przypadku ograniczenia ilości wody zarobowej do minimum, pozwalającego zachować urabialność, ma ona tendencję do pokrywania najpierw twardych powierzchni (kruszywo), a dopiero później pęcherzyków powietrza pochodzących od dodatków napowietrzających. Poniżej krytycznej zawartości wody w mieszance dodatki napowietrzające są nieskuteczne, nawet dodane w dużych ilościach (5-10-krotnie więcej niż w tradycyjnych mieszankach betonowych). Jednak zgodnie z aktualnym stanem wiedzy istnieją producenci, którzy stosują domieszki napowietrzające do mieszanek betonowych RCC, aby zminimalizować liczbę potencjalnych uszkodzeń betonu spowodowanych działaniem mrozu. Na ogół cel osiąga się poprzez stosowanie efektywnie niskiego stosunku w/c w taki sposób, ażeby stopień przepuszczalności betonu był znikomy, a jednocześnie na tyle wysoki, by domieszka napowietrzająca miała wpływ na właściwości mrozoodporne betonu. Po tym jak mieszanka betonowa zostanie wbudowana i odpowiednio zagęszczona, pory powierzchni zamknięte, zaś następnie odpowiednio pielęgnowana - beton RCC staje się szczelny, a przez to odporny na działanie niskich temperatur. Po naturalnej utracie wilgoci w procesie twardnienia bardzo trudno ponownie nasączyć beton RCC wodą. Użycie właściwych technik zagęszczania mieszanki RCC, która ma na celu zwiększenie wytrzymałości betonu, obniżenie jego przepuszczalności i obniżenie liczby pustek powietrznych, skutkuje wzrostem odporności na przemarzanie. Do napowietrzania mieszanki betonowej należy stosować domieszki mieszanek betonowych z domieszkami napowietrzającymi oraz sposób oznaczania w nich zawartości powietrza, powinny być zgodne z *PN-EN 12350-7:2001 Badanie mieszanki betonowej*. Zalecaną zawartość powietrza w mieszance betonowej podano w tab. 1.

Jednakże Philleo R. [2], rozpatrując możliwość otrzymania betonu w pełni mrozoodpornego, bez stosowania napowietrzania, sformułował następujące tezy, które mówią o tym, że powinno nastąpić technologiczne:

- wyeliminowanie porów kapilarnych poprzez stosowanie zaczynu o w/c bliskim 0,38 oraz pielęgnację wodną do czasu, ▶

- ▶ aż wszystkie przestrzenie nie zostaną wypełnione produktami hydratacji;
- modyfikowanie procesu hydratacji cementu tak, aby produkty hydratacji szczelnie wypełniały przestrzeń porów kapilarnych, dzięki czemu jest możliwe uzyskanie drobnoporowatej struktury niezawierającej wody zdolnej do zamarzania;
- wytwarzanie zaczynów o tak niskiej przepuszczalności, że po ukończeniu procesu samosuszenia nie są w stanie ponownie ulec nasączeniu w normalnych warunkach eksploatacji.

W warunkach rzeczywistych realizacji drogowych z obecnością warstwy ścieralnej z betonu wałowanego uzyskanie odpowiednich wyników badań dotyczących gęstości objętościowej z reguły potwierdza prawidłowe zagęszczenie betonu w nawierzchni [4], [9]. Niska nasiąkliwość oraz brak widocznych porów kapilarnych w przełomie próbek mogą się przekładać na dobre właściwości mrozoodporne nawierzchni z betonu wałowanego. Zagadnienie mrozoodporności betonu wykonanego w technologii RCC nie jest w pełni jeszcze rozpoznane w warunkach krajowych. Literatura amerykańska [5], [6], [8] przedstawia wyniki potwierdzające dobrą trwałość mrozową nawierzchni z RCC, w warunkach eksploatacji typowych dla dróg lokalnych, parkingów, placów postojowych itp. Doświadczenia autorów polskich publikacji dotyczyły obserwacji wykonanych odcinków dróg po paru sezonach zimowych. Polskie nawierzchnie z RCC nie wykazały objawów destrukcji, pomimo stosowania środków utrzymania zimowego dróg.

Tendencja do wypiętrzania się nawierzchni betonowej

Mechanizm powstania zjawiska wypiętrzenia warstwy nawierzchni betonowej następuje w wyniku inicjacji ruchu płyty betonowej. Zjawisko występuje wskutek rozszczelnienia materiału, które wywołane jest zmianami temperatury. Zawsze występuje w kombinacji z ciągiem przyczyn wspomagających, na przykład niepożądanych reakcji alkalicznych. Mechanizm wypiętrzenia powstaje przy ogrzaniu płyty na skutek letniego nasłonecznienia do temperatury bliskiej 50°C. Przy tej temperaturze obserwowane jest zjawisko rozszerzenia materiału, dla nawierzchni RCC, gdzie współczynnik wypiętrzenia wynosi od 0,6 mm/m do 1,2 mm/m. Dodatkową przyczyną powstawania wypiętrzenia może być zmiana grubości warstw konstrukcji pod płytą betonową, tj. przy zmianie grubości o nawet 20 mm powstaje klin wypiętrzający. Reakcje alkaliczne w kruszywie warstw podbudowy i w samej warstwie płyty RCC powodują przyrost objętości. Zmiany temperatury powodują w swobodnej płycie betonowej zmianę jej objętości. Jeśli działa ona równomiernie na całej grubości, to wywołuje odkształcenie osiowe. Jeżeli zmiana temperatury jest funkcją odległości od górnej powierzchni płyty, to następuje jej wygięcie. W płycie swobodnej i nieważkiej rozpatrywane rozkłady temperatur nie wywołują stanów naprężeń. Natomiast gdy płyta nie może się swobodnie odkształcać wskutek ciężaru własnego oraz skrępowania, największe naprężenia rozciągające powstają na dolnej powierzchni płyty. Jeżeli natomiast dolna powierzchnia płyty ma wyższą temperaturę od górnej, to płyta ma tendencję do odkształcania się ku dołowi i wtedy największe naprężenia wskutek ciężaru własnego pojawiają się na górnej powierzchni.

Trwałość nawierzchni z betonu wałowanego jest wynikiem zachowania zasad projektowania i reżimu podczas wytworzenia oraz wbudowania mieszanki betonowej. Niewielkie doświadczenie inwestorów, projektantów i użytkowników powodowały dotychczas hamowanie rozwoju tej technologii w Polsce. Jako Spółka CEMEX Infrastruktura wykonaliśmy w Polsce kilkanaście obiektów z zastosowaniem nawierzchni w technologii betonu wałowanego i wiemy, że doskonale sprawdza się ona w miejscach o stosunkowo dużych obciążeniach ruchem i relatywnie niskich prędkościach osiągniętych przez poruszające się po nich pojazdy. Najbardziej popularne zastosowania RCC obejmują: drogi lokalne, place składowe, parkingi, drogi techniczne oraz pasy awaryjne autostrad. W dotychczasowych procedurach przetargowych, ogłaszanych w latach 2013-2014, beton wałowany okazywał się materiałem konkurencyjnym cenowo w porównaniu do nawierzchni asfaltowej.



Andrzej Wójtowicz, CEMEX

Wpływ temperatury na nawierzchnię betonową ma charakter bardzo złożony. Głównym źródłem ciepła, które nawierzchnia wchłania, jest energia słoneczna [3]. Jeżeli chodzi o ograniczenie wpływów termicznych, to w przypadku płyt niezbrojonych ogranicza się długości płyt.

Podsumowanie

Trwałość warstw z betonu wałowanego w konstrukcjach drogowych jest uwarunkowana wieloma czynnikami. Prawidłowo dobrana receptura mieszanki betonowej współzależna z technologicznym systemem wbudowania i wałowania to generalna płaszczyzna tego zagadnienia. Spełnienie wymagań szczegółowego reżimu technologicznego przyczynia się zawsze pozytywnie do uzyskania dobrej dogęszczonej, szczelnej powierzchni betonu wykazującej podwyższoną trwałość w aspekcie mrozoodporności. Równocześnie nie można zapominać, że warstwy z betonu wałowanego koegzystują w konstrukcji drogowej z warstwami podbudowy, pracując zawsze w określonych, swoistych dla danej lokalizacji warunkach wodno-gruntowych. □

Piśmiennictwo

1. König R., Wagner J.P.: *Mikrokrzemionka*. Woermann Bauchemie, Kraków 2009.
2. Piasta J., Piasta W.G.: *Beton zwykły*. Arkady, Warszawa 1997.
3. Szydło A.: *Nawierzchnie z betonu cementowego*. Polski Cement, Kraków 2004.
4. Woyciechowski P., Harat K.: *Beton wałowany jako nawierzchnia dróg lokalnych*. „Materiały Budowlane”, nr 9, 2011.
5. Portland Cement Association: *Guide Specification for Construction of Roller-Compacted Concrete Pavements*. 2004.
6. American Concrete Institute: *Report on Roller-Compacted Concrete Pavements*, ACI 325.10R-95, 2001.
7. Generalna Dyrekcja Dróg Krajowych i Autostrad: *Ogólne specyfikacje techniczne. Drogowy beton wałowany*. 2013.
8. U.S. Army Corps of Engineers: *Thickness design of Roller-compacted concrete pavements for airfields, roads, streets and parking areas*. 1988.
9. www.cemex.pl.