

Janusz Szwabowski¹

CEL I ZAŁOŻENIA PROJEKTU „INNOWACYJNE CEMENTY NAPOWIETRZAJĄCE BETON”

Projekt finansowany przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju w ramach PBS 1

1. Wprowadzenie

Wśród metod materiałowo-strukturalnej ochrony betonu przed szkodliwym działaniem mrozu można wyodrębnić dwa zasadnicze sposoby uzyskania jego mrozoodporności: przez napowietrzenie go domieszką napowietrzającą lub przez obniżenie stosunku $w/c < 0.4$. Zasadność takiego postępowania wynika z faktu, że przy $w/c > 0.4$ beton ma strukturę kapilarno-porowatą. Występujące pory kapilarne zawierają wodę, która w ujemnych temperaturach zamarza od zewnątrz powiększając swą objętość o ok. 9%, powodując wypychanie nie zamrożonej wody w głąb pustych porów. Gdy droga przepływu wody przekracza odległość krytyczną, to ciśnienie wywierane przez wodę na ścianki kapilar przekracza wytrzymałość zaczynu na rozciąganie, niszcząc jego strukturę. Maksymalne ciśnienie wody zamarzającej w zamkniętej przestrzeni może przekroczyć nawet 200 MPa. Warunkiem powstania ciśnienia krytycznego jest przekroczenie granicznego stopnia nasycenia betonu wodą. Dlatego hipoteza została nazwana przez Powersa teorią ciśnienia hydraulicznego [1]. Wprowadzone napowietrzeniem dodatkowe pory wielkości $0,01 \div 0,20$ mm [4] kompensują to ciśnienie, bowiem w nie może być wtłaczana woda wypychana przez lód w kierunku postępującego zlodowacenia, co zapobiega destrukcji struktury betonu. Aby to było możliwe, jak wyliczył Powers [2], uśredniona największa odległość od dowolnego

¹ prof. dr hab. inż. Politechnika Śląska, Janusz.Szwabowski@polsl.pl

punktu wewnątrz stwardniałego zaczynu cementowego do najbliższej położonego pora powietrznego, oznaczona \bar{L} i wymagana do pełnego zabezpieczenia przed uszkodzeniami mrozowymi powinna wynosić 0,25 mm lub 0,20 mm w przypadku stosowania środków odladzających. Opisana hipoteza ciśnienia hydraulicznego jest wciąż jedną z najważniejszych, uwzględniających wpływ mikrostruktury zaczynu w procesie destrukcji betonu pod wpływem działania mrozu, również w obecności soli odladzających [3],[4],[5].

W efekcie napowietrzenia uzyskuje się pory o średnicy rzędu 50 μm (od 10 μm do 300 μm wg [6]). Z punktu widzenia mrozoodporności betonu, ważne jest także, aby żeby zapewnić możliwie duży udział porów żelowych i porów powietrznych o wymiarach 0,1÷0,2 μm . W przypadku betonów narażonych na cykliczne zamrażanie i rozmrażanie wymagania dotyczące struktury porowatości napowietrzonych betonów w klasie XF1÷XF4 wg kilku norm europejskich przytoczono w pracy [7]. Wskazania "Guide to Durable Concrete" (ACI 201.2R) [8] ograniczają wartość wskaźnika rozstawu porów \bar{L} do wartości <0,20 mm. Zwrócić należy uwagę na to, że podczas pompowania betonu wartość tego wskaźnika wzrasta [9].

Jednak końcowa jakość napowietrzania betonu jest wypadkową oddziaływania wielu czynników materiałowych i technologicznych. Do czynników materiałowych [10] należą np.: rodzaj i ilość środka napowietrzającego, konsystencja mieszanki, w/c, ilość i rodzaj cementu, dodatki mineralne, domieszki chemiczne. Zaś czynniki technologiczne to głównie: temperatura mieszanki, czas transportu, sposób układania i zagęszczania mieszanki. Stosowanie domieszek napowietrzających łącznie z superplastyfikatorami w różnych kombinacjach dozowania może wywoływać często bardzo odmienne od oczekiwanych efekty.

Jeśli chodzi o cement, to zaleca się zwiększenie dawki domieszki napowietrzającej ponad zalecaną w przypadkach, gdy cement posiada zwiększoną powierzchnię właściwą lub charakteryzuje się zwiększoną zawartością alkaliów [4]. Ogólnie można stwierdzić, że im wyższa zawartość C_3A w cemencie, tym większe są defekty mrozowe na powierzchniach próbek, lecz znaczenie rodzaju spoiwa maleje wraz ze zmniejszaniem się stosunku w/c. Oprócz rozdrobnienia cementu, istotny jest także rodzaj i ilość dodatków mineralnych wchodzących w skład cementów (cement portlandzki wieloskładnikowy CEM II, cement hutniczy CEM III i cement wieloskładnikowy CEM V). Dodatki mineralne wywołują

korzystne zmiany w strukturze porowatości zaczynu (betonu) powodując zmniejszenie udziału porów kapilarnych, a zwiększenie ilości porów żelowych [11]. Jednak wpływ dodatków na mrozoodporność betonu ma charakter zmienny a ich jakość wpływa na wymaganą dawkę środka napowietrzającego [6]. Wyniki badań betonów na cementach z dodatkami mineralnymi wskazują, że pomimo lepszej szczelności i wyższej wytrzymałości, występują jednak problemy z mrozoodpornością betonów nienapowietrzanych, nawet w warunkach umiarkowanego oddziaływania mrozu [12].

2. Problemy napowietrzenia i zapewnienia mrozoodporności betonów na cementach z dodatkami

Wpływ poszczególnych dodatków mineralnych, jako składników cementu na mrozoodporność betonu jest zróżnicowany. Granulowany zmielony żużel wielkopieczowy, podobnie jak popioły lotne, wymaga starannego doboru środka napowietrzającego poprzez badania jego efektywności i kompatybilności z plastyfikatorem lub superplastyfikatorem. W betonach narażonych na oddziaływanie soli ACI 318-95 zaleca ograniczać zawartość żużla do 50% masy całkowitej spoiwa (cement + żużel) [4][13]. Jednakże największe problemy z właściwym napowietrzeniem występują w przypadku mieszanek betonowych zawierających popiół lotny. Główną ich przyczyną jest to, że występujący w popiele lotnym koksik o rozwiniętej powierzchni właściwej (straty prażenia) może absorbować na swojej powierzchni czynnik powierzchniowo czynny, obniżając w ten sposób jego efektywność działania w zaczynie. W konsekwencji, może być wymagana większa ilość domieszki napowietrzającej w celu uzyskania tego samego stopnia napowietrzenia mieszanki betonowej. Popiół lotny, nawet w małych ilościach, zmniejsza o ok. 1% naturalną zawartość powietrza [6]. Wprawdzie Fagerlund [6] sugeruje, iż dla betonu z domieszką napowietrzającą wpływ popiołu lotnego jest nieznaczny, pod warunkiem, że jego zawartość nie przekroczy 25% (ACI 318-95 zaleca ograniczenie pucolan do wartości 25%). Jeżeli jednak rozmieszczenie niespalonego koksiku w masie betonu jest nierównomierne, wówczas mogą powstać w nim strefy o różnej zawartości powietrza. Dlatego sugeruje on większą dawkę domieszki napowietrzającej.

3. Cel Projektu

Celem projektu jest opracowanie wytycznych technologii produkcji innowacyjnych cementów napowietrzających beton tj. połączenie procesu produkcji cementu (mielenia, mieszania) z wysoką zawartością dodatków mineralnych (CEM II, CEM III, CEM V) z procesem wprowadzenia do składu cementu kompatybilnej z nim domieszki napowietrzającej, eliminując z procesu projektowania betonu dobór rodzaju i ilości domieszki napowietrzającej. Efektem zastosowania takiego cementu będzie beton napowietrzony, a w rezultacie tego, beton mrozoodporny.

4. Zasadność celu projektu

Wdrożenie w technologii betonu cementów napowietrzających ma doprowadzić do rozszerzenia zakresu stosowania cementów z wysoką zawartością dodatków mineralnych w budownictwie na takie obszary jak: inżynieria komunikacyjna, budowa placów i dróg, zapraw mrozoodporne, betonowanie w warunkach obniżonych temperatur, itp. Szersze stosowanie cementów z dodatkami (CEM II, CEM III, CEMV) jest ważne dla gospodarki kraju, zarówno z ekonomicznego jak i ekologicznego punktu widzenia. W procesie ich wytwarzania jest mniejsza emisja CO₂ (mniej surowco- i energochłonnego klinkieru portlandzkiego) i mniejsze zużycie klinkieru portlandzkiego (na 1 tonę klinkieru potrzeba ok. 1,6 tony surowców nieodnawialnych) od 6% do 35% w przypadku cementów portlandzkich wieloskładnikowych CEM II i od 36% do 95% w przypadku cementów hutniczych CEM III. Szersze stosowanie dodatków w składzie cementu to także droga do produkcji większej ilości pełnowartościowych spoiw dla budownictwa. Dodatkowe efekty takiego postępowania to efekty ekologiczne: oszczędność naturalnych zasobów surowcowych i paliw kopalnych (węgiel), wykorzystanie ubocznych produktów przemysłowych i wydłużenie cyklu życia konstrukcji i obiektów budowlanych (trwałość). Postępowanie takie idealnie wpisuje się w filozofię zrównoważonego rozwoju budownictwa.

Istotnym efektem projektu będzie zwiększenie mrozoodporności betonu bez wiedzy użytkownika cementu. Jest to szczególnie ważne w przypadku stosowania cementu workowanego. Użytkownik takiego cementu nie ma wiedzy i możliwości technologicznego ukształtowania betonu mrozoodpornego. Wprowadzenie na rynek takich cementów

skutkować będzie znacznym wzrostem trwałości produkowanych elementów budowlanych i wznoszonych obiektów budowlanych (budynki jednorodzinne, małe obiekty handlowe, galanteria betonowa).

5. Zadania badawcze Projektu

ZADANIE 1. Badanie efektywności działania domieszek napowietrzających.

Cele: Wybór domieszek napowietrzających efektywnie działających z danymi cementami pod kątem produkcji cementów napowietrzających będzie dokonany na podstawie:

1. Określenia efektywności działania analizowanych domieszek napowietrzających, przeznaczonych docelowo do zastosowania w innowacyjnych cementach napowietrzających, (CEM II, CEM III i CEM V) w porównaniu do skuteczności domieszek napowietrzających wprowadzanych bezpośrednio do mieszanki betonowej.
2. Określenie optymalnej zawartości domieszki napowietrzającej w docelowych innowacyjnych cementach wieloskładnikowych (CEM II, CEM III i cement CEM V), w produkowanych w zadaniu 2 na potrzeby kolejnych zadań projektu.

Wykonawca: Politechnika Śląska, **Sposób realizacji:** W pierwszej kolejności, zostaną porównane różnego rodzaju domieszki napowietrzające pod względem ich efektywności działania, w zależności od rodzaju cementu i zawartego dodatku mineralnego w jego składzie (popiół lotny, granulowany żużel wielkopieczowy.): CEM II, CEM III i CEM V.

W drugiej kolejności nastąpi wybór najbardziej efektywnych domieszek napowietrzających dla cementów: CEM II, CEM III i CEM V, ze względu na optymalną zawartość powietrza w normowej zaprawie cementowej i mieszance betonu wzorcowego wg PN EN 480-1. Badania właściwości domieszek napowietrzających zostanie przeprowadzone w zakresie zdolności napowietrzania normowych zapraw cementowych. Zakres badań obejmować będzie: konsystencja zapraw cementowych, zdolność do napowietrzania cementów o różnym składzie - zawartość powietrza w zaprawie cementowej, wytrzymałość na zginanie i ściskanie zaprawy cementowej, zawartość powietrza w mieszance betonu wzorcowego.

Efektem zadania będzie wskazanie rodzaju i ilości domieszki napowietrzającej do określonego rodzaju cementu (CEM II, CEM III, CEM V), określenie optymalnego napowietrzenia oraz wskazanie wytycznych technologicznych do prób w skali przemysłowej.

ZADANIE 2. Produkcja i badania cementów z domieszkami napowietrzającymi.

Cele: Dla ustalonych w zadaniu 1 domieszek napowietrzających produkcja i badania doświadczalnych partii cementów napowietrzających na potrzeby realizacji kolejnych zadań badawczych projektu.

1. Określenie efektywności działania analizowanych domieszek napowietrzających, przeznaczonych docelowo do zastosowania w innowacyjnych cementach napowietrzających beton, wieloskładnikowych w porównaniu do skuteczności domieszek napowietrzających wprowadzanych bezpośrednio do mieszanki betonowej.
2. Określenie, efektywności działania analizowanych domieszek napowietrzających dla innowacyjnych cementów napowietrzających wieloskładnikowych napowietrzających beton (CEM II, CEM III, CEM V) w porównaniu do skuteczności domieszek napowietrzających wprowadzanych bezpośrednio do mieszanki betonowej.
3. Określenie optymalnej zawartości domieszki w cementach napowietrzających.
4. Ustalenie podstawowych zależności pod kątem technologii produkcji innowacyjnych cementów napowietrzających beton.

Wykonawca: ICiMB/OSiMB Kraków. **Sposób realizacji:**

Podzadanie 2.1. Produkcja cementów napowietrzających – zakłada się ciągłą, w zależności od potrzeb programu badań, produkcję następujących cementów wytwarzanych w skali półtechnicznej: jeden z grupy CEM I – referencyjny oraz po dwa cementy z grupy cementów wieloskładnikowych CEM II, CEM III i CEM V. Cementy produkowane będą, jako referencyjne bez domieszki napowietrzającej oraz z dwoma wytypowanymi domieszkami, w technologiach: mieszania i wspólnego przemiału składników cementu. Drugą część podzadania 2.1. stanowić będzie produkcja wybranych cementów napowietrzających w skali półtechnicznej, głównie pod kątem prób poligonowych produkcji i oceny cech użytkowych betonów napowietrzanych.

Podzadanie 2.2. Badania właściwości cementów napowietrzających – w podzadaniu tym realizowane będą badania wyprodukowanych cementów, w zakresie właściwości normowych cementów powszechnego użytku oraz właściwości napowietrzających. Odpowiednio zakres badań obejmować będzie:

wodozgodność, początek i koniec czasu wiązania, konsystencja zaprawy, wytrzymałość na zginanie i ściskanie, skurcz zaprawy, stałość objętości, ciepło hydratacji, skład chemiczny, zdolność napowietrzania – zawartość powietrza w zaprawie.

ZADANIE 3. Badania efektywności działania cementów napowietrzających beton.

Cele:

1. Weryfikacja efektywności innowacyjnych cementów napowietrzających beton, w porównaniu do skuteczności domieszek napowietrzających wprowadzanych bezpośrednio do zaprawy cementowej.
2. Określenie wpływu cementów napowietrzających beton na właściwości reologiczne zaprawy.
3. Ocena efektywności działania innowacyjnych cementów napowietrzających beton w zależności od zmiennych czynników materiałowo-technologicznych.
4. Określenie wytycznych do stosowania w praktyce innowacyjnych cementów napowietrzających beton.

Wykonawca: Politechnika Śląska. **Sposób realizacji:** Wyprodukowane w zadaniu 2. innowacyjne cementy napowietrzające beton zostaną ocenione pod względem efektywności ich napowietrzania zaprawy w odniesieniu do skuteczności domieszek napowietrzających wprowadzanych bezpośrednio do zaprawy cementowej.

Efektem zadania będzie ocena skuteczności napowietrzania zaprawy cementowej innowacyjnymi cementami napowietrzającymi (CEM II, CEM III, CEM V) oraz ocena wpływu istotnych czynników materiałowo-technologicznych (skład cementu, temperatura, stosunek w/c) na skuteczność działania innowacyjnego cementu napowietrzającego w zaprawie cementowej.

Badania innowacyjnych napowietrzających wieloskładnikowych cementów CEM II, CEM III i CEM V zostanie przeprowadzone w zakresie efektywności napowietrzania. Odpowiednio zakres badań obejmować będzie: zdolność napowietrzania – zawartość powietrza w zaprawie cementowej, konsystencja zaprawy cementowej i utrzymanie jej w czasie, wytrzymałość na zginanie i ściskanie zaprawy cementowej, skurcz zaprawy cementowej.

ZADANIE 4. Ocena kompatybilności nowej generacji domieszek chemicznych uplastyczniających i upłynniających z innowacyjnymi cementami napowietrzającymi beton.

Cele:

1. Ocena kompatybilności nowej generacji plastyfikatorów i superplastyfikatorów z cementami napowietrzającymi w porównaniu do cementów bez domieszki napowietrzającej.

2. Sprawdzenie plastyfikatorów i superplastyfikatorów kompatybilnych z innowacyjnymi cementami napowietrzającymi w zależności od zmiennych czynników materiałowo-technologicznych.
3. Weryfikacja wpływu wybranych plastyfikatorów i superplastyfikatorów na stabilność napowietrzenia zaprawy cementowej wykonanej z udziałem innowacyjnych cementów napowietrzających beton.
4. Ocena wpływu wybranych plastyfikatorów i superplastyfikatorów na stabilność napowietrzenia zaprawy cementowej wykonanej z udziałem innowacyjnego cementu napowietrzającego w porównaniu do zaprawy wykonanej z udziałem cementów tradycyjnym składzie i domieszki napowietrzającej, bezpośrednio dozowanej do zaprawy.
5. Ustalenie wymaganej ilości wybranych plastyfikatora lub superplastyfikatorów w zaprawie cementowej wykonanej z udziałem innowacyjnego cementu napowietrzającego, celem uzyskania wymaganej konsystencji i napowietrzenia mieszanki betonowej.

Wykonawca: Politechnika Śląska. **Sposób realizacji:** Wobec konieczności upłynnienia napowietrzanej mieszanki betonowej o różnym w/c (od 0,55 do 0,45) oraz dużej liczby dostępnych na rynku plastyfikatorów i superplastyfikatorów, ocenę ich kompatybilności z badanymi w tym zadaniu innowacyjnymi cementami napowietrzającymi, należy przeprowadzić w sposób doświadczalny. Kompatybilność plastyfikatora lub superplastyfikatora i danego rodzaju cementu napowietrzającego zostanie oceniona ze względu na konsystencję zaprawy, utrzymywanie jej w czasie oraz wynikowe jej napowietrzenie. Ponadto, istotnym zagadnieniem jest określenie wpływu istotnych czynników materiałowo-technologicznych, na efekty współdziałania superplastyfikatorów z napowietrzającymi cementami.

W pierwszym etapie badań dokonana będzie ocena kompatybilności plastyfikatorów i superplastyfikatorów z napowietrzającymi cementami w porównaniu do cementów o tradycyjnym składzie. Następnie przeprowadzone będzie sprawdzenie kompatybilnych superplastyfikatorów z innowacyjnymi cementami napowietrzającymi, w zależności od zmiennych czynników materiałowo-technologicznych (temperatura, skład, zmienne w/c). Po czym, dokonana będzie weryfikacja wpływu wybranych plastyfikatorów i superplastyfikatorów na stabilność napowietrzenia zaprawy cementowej, wykonanej z

udziałem innowacyjnego cementu napowietrzającego. W końcu zostanie przeprowadzona ocena wpływu wybranych plastyfikatorów lub superplastyfikatorów na stabilność napowietrzenia zaprawy cementowej wykonanej z udziałem innowacyjnego cementu napowietrzającego w porównaniu do zaprawy wykonanej z udziałem cementu wieloskładnikowego o tradycyjnym składzie i domieszki napowietrzającej, bezpośrednio dozowanej do zaprawy.

Ostatecznym celem tego zadania jest ustalenie rodzaju i wymaganej ilości plastyfikatora lub superplastyfikatora w zaprawie cementowej, wykonanej z udziałem innowacyjnego cementu napowietrzającego, celem uzyskania pożądanej konsystencji i optymalnego napowietrzenia mieszanki betonowej. Zadanie realizowane będzie w zakresie właściwości normowych zapraw cementowych. Odpowiednio zakres badań obejmuje:

konsystencję zaprawy i utrzymanie jej w czasie, zdolność napowietrzania i zawartość powietrza w zaprawie, wytrzymałość na zginanie i ściskanie zaprawy cementowej.

ZADANIE 5. Badanie wpływu innowacyjnych napowietrzających, wieloskładnikowych cementów na właściwości mieszanki betonowej i betonu, w aspekcie jego wytrzymałości, charakterystyki napowietrzenia i mrozoodporności.

Cele:

1. Określenie wpływu innowacyjnych cementów napowietrzających (CEM II, CEM III, CEM V) na konsystencję i napowietrzenie mieszanki betonowej.
1. Określenie zmiennych czynników technologicznych i materiałowych na efektywność napowietrzania przez innowacyjne cementy napowietrzające beton.
2. Określenie wpływu innowacyjnych cementów napowietrzających na właściwości mechaniczne betonu.
3. Określenie wpływu innowacyjnych cementów napowietrzających na mrozoodporność betonu.
4. Określenie wpływu innowacyjnych cementów napowietrzających na charakterystykę napowietrzenia stwardniałego betonu w aspekcie mrozoodporności betonu.

Wykonawca: Politechnika Śląska. **Sposób realizacji:** W pierwszym etapie badań zostanie przeprowadzone badanie efektywności działania innowacyjnych cementów napowietrzających beton (CEM II, CEM III, CEM V) ze względu na zawartość powietrza w mieszance betonowej.

Następny etap badań związany będzie z określeniem zmiennych czynników technologicznych i materiałowych, m.in. wpływu konsystencji i w/c, na efektywność napowietrzania przez innowacyjne cementy napowietrzające.

W kolejnym etapie badań zostaną przeprowadzone badania właściwości mechanicznych i mrozoodporności stwardniałego betonu: wewnętrznej i na powierzchniowe łuszczenie (w obecności soli odladzających). Mrozoodporność wewnętrzna będzie oceniana także na podstawie pomiaru współczynnika trwałości betonu (z ang. durabilityfactor). W dalszym ciągu badań oceniona zostanie charakterystyka struktury porowatości betonu wg PN EN 480-11. Następnie, charakterystyka napowietrzania betonu zostanie porównana z wynikami badań mrozoodporności betonu. Odpowiednio zakres badań obejmować będzie: zawartość powietrza w mieszance betonowej, konsystencję mieszanki betonowej utrzymanie jej w czasie, wytrzymałość betonu na ściskanie i zginanie, mrozoodporność wewnętrzną betonu, odporność na powierzchniowe łuszczenie betonu poddanego oddziaływaniu soli odladzających, charakterystyka struktury porów powietrznych w stwardniałym betonie. Efektem końcowym zadania będzie opracowanie instrukcji stosowania innowacyjnych cementów (CEM II, CEM III, CEM V) napowietrzających beton w technologii betonów mrozoodpornych.

ZADANIE 6. Koncepcja technologii produkcji innowacyjnych cementów napowietrzających beton.

Cel: Opracowanie wytycznych techniczno-technologicznych produkcji cementów napowietrzających.

Wykonawca: ICiMB/OSiMB Kraków. **Sposób realizacji:** Opracowanie wytycznych techniczno-technologicznych produkcji cementów napowietrzających będzie efektem analizy wyników z przeprowadzonych w zadaniach 1÷5 badań. Wytyczne techniczno-technologiczne będą uwzględniać:

- podanie rodzaju domieszki dla określonego cementu,
- rozwiązania dozowania domieszki napowietrzającej w procesie wytwarzania cementu, wprowadzanej do młyna cementu lub dozowanej do cementu za młynem,
- ustalenie optymalnej ilości domieszki z podaniem tolerancji dozowania,
- określenie oceny skuteczności domieszki napowietrzającej poprzez kontrolę napowietrzania, podanie warunków oceny zgodności cementów z uwzględnieniem obowiązujących norm dla cementów powszechnego użytku.

Literatura

- [1] Powers T.C.: The mechanism of frost action in concrete. Stanton Walker Lecture No 3, National Sand.
- [2] Powers T.C.: The air-requirement of frost resistance concrete. Proceedings, Highway Research Board 1949, Vol. 29.
- [3] Newlon H., Mitchell T.M.: Freezing and Thawing. Significance of Test and Properties of Concrete and Concrete-Making Materials. P. Klieger, J. F. Lamond, ASTM Publication, USA 1994.
- [4] Rusin Z.: Technologia betonów mrozoodpornych, Polski Cement, Kraków 2000.
- [5] Stark J., Wicht B.: Frost-und Frost – Tausalz – Widerstand von Beton, Dauerhaftigkeit von Beton. Der Baustoffals Werkstoff. A., Finger Institute für Baustoffkunde, Bauhaus-Universität Weimer, Berlin 2001.
- [6] Fagerlund G.: Trwałość konstrukcji betonowych, Arkady, Warszawa, 1999.
- [7] Glinicki M.A.: Europejskie wymagania na beton napowietrzony w klasie środowiska XF. Drogownictwo, nr 3/2005, 86-88.
- [8] Guide to durable concrete. Reported by ACI Commiittee 201, ACI Journal, Vol. 74, No. 12, 1979, pp. 573-582.
- [9] Philleo R.E.: Freezing and Thawing Resistance of High Strength Concrete. National Cooperative Highway Research Programme Synthesis of Highway practice 129, Transportation Research Board, National Research Council, Washington 1986.
- [10] ACI Education Bulletin E4-12, Chemical Admixtures for Concrete. Developed by ACI Committee E-701.
- [11] Jasiczak J., Mikołajczyk P.: Technologia betonu modyfikowanego domieszkami i dodatkami. Przegląd tendencji krajowych i zagranicznych. Politechnika Poznańska, Poznań 1997.
- [12] Kjellsen K., Atlassi E.: Porestructure of cement silicafume system – Presence of hollow-shell pores. Cement and Concrete Research, Vol. 29, 1999, pp. 133-142.
- [13] Stark J., Ludwig H.: Freeze-thaw and freeze-deicing salt resistance of concrete containing cement rich in granulated ballast furnace slag. ACI Materials Journal, Vol. 94, No.1, 1997, pp. 47-55.