

dr inż. Daria Józwiak-Niedźwiedzka

Instytut Podstawowych Problemów Techniki, Polska Akademia Nauk

mgr inż. Danuta Kowalska

Instytut Techniczny Wojsk Lotniczych

CIENKIE SZLIFY W OCENIE TRWAŁOŚCI MROZOWEJ BETONÓW Z POPIOŁEM FLUIDALNYM

Thin section analysis applied for estimation of frost durability of concretes with fluidized fly ash

Streszczenie

Tematem referatu jest ocena mikrostruktury betonów z dodatkiem popiołów fluidalnych pod kątem trwałości mrozowej tych betonów, dokonana na cienkich szlifach. Zamieszczono opis przygotowywania cienkich szlifów betonowych oraz przedstawiono wyniki analizy cienkich szlifów uzyskane za pomocą mikroskopu optycznego do obserwacji mikrostruktury betonu w świetle spolaryzowanym i w świetle ultrafioletowym. Scharakteryzowano m.in. rodzaj i wielkość kruszywa (analiza petrograficzna), a także przeprowadzono analizę jednorodności współczynnika wodno-cementowego ocenianą na podstawie rozkładu intensywności barwnika fluoroscencyjnego w świetle UV.

Zbadano mrozoodporność i odporność na powierzchniowe łuszczenie betonów z dużą zawartością popiołów fluidalnych. Na podstawie przeprowadzonych badań laboratoryjnych stwierdzono, że betony charakteryzują się mrozoodpornością i brakiem odporności na powierzchniowe łuszczenie. Po dokładnej analizie cienkich szlifów betonowych podjęto próbę wyjaśnienia przyczyny braku trwałości na powierzchniowe łuszczenie.

Abstract

The paper presents the results of microstructural characterization of concrete containing fluidized bed (FB) ash after undergoing the standard freezing and thawing and scaling resistance tests. The evaluation of the microstructure was performed using thin sections prepared from concrete before and after the test. All thin sections were impregnated with epoxy containing fluorescent dye and were examined using transmitted polarized light, crossed polarized light and UV light. The thin section evaluation involved petrographic characterization of aggregates and examination of paste quality (including estimation of the effective water/binder ratio). The results of thin section analysis of the original (before being exposed to freezing and thawing and scaling tests) FB fly ash concrete showed that its microstructure was more dense than that of the ordinary concrete. However, when examined after undergoing the freezing and thawing tests the microstructure of FB fly ash concrete showed numerous microcracks while the microstructure of plain concrete remained virtually cracks-free. In addition, numerous zones of less-dense paste were observed at the aggregate-paste interfaces (especially below the aggregate particles) in the plain concrete mixes. The results of these observations suggest that the current methods of classifying the freeze-thaw resistance of concrete (using the compressive strength test) may need to be revised to more adequately reflect the microstructural damage observed in the specimens.

1. Wstęp

Mikroskopia optyczna z wykorzystaniem cienkich szlifów jest znaną metodą badania stwardniałego betonu, pozwalającą na poznanie jego mikrostruktury. Zwykle obserwacje mikroskopowe przeprowadza się z zastosowaniem światła spolaryzowanego przy równoległych i przy skrzyżowanych nielach. Wykorzystanie światła UV stwarza możliwość uzyskania dodatkowych informacji dotyczących mikrostruktury betonu, niezbędnych do oceny jego jakości, a także ważnych przy podejmowaniu próby wyjaśnienia przyczyn zachodzących zjawisk. Obraz cienkich szlifów w świetle UV dostarcza informacji odnośnie do jakości zaczynu i kruszywa, systemu porów powietrznych, defektów struktury jak np. rysy, ich wielkości i rozmieszczenia oraz stosunku wodno-spoiwowego czyli tych informacji, które mają znaczenie przy określaniu przyczyny zniszczenia betonu, [1].

Mikroskopia optyczna wykorzystująca cienkie szlify impregnowane żywicą fluorescencyjną jest również pośrenią, precyjną metodą określania w/c w betonie stwardniałym zarówno do oceny jakości betonu „młodego”, jak i badania degradacji betonu w czasie użytkowania. Od wielkości stosunku w/c zależna jest wytrzymałość i trwałość betonu. Stosunek w/c łatwo jest kontrolować podczas wytwarzania betonu, natomiast w betonie stwardniałym bezpośrednie określenie stosunku w/c nie jest możliwe.

Obecnie obserwacje mikroskopowe na cienkich szlifach impregnowanych żywicą z dodatkiem barwnika fluorescencyjnego są powszechnie stosowane na świecie do analizy sposobu zniszczenia i badania przyczyn wystąpienia uszkodzeń betonów pobranych z rzeczywistych obiektów. Można dokonać np. identyfikacji wtórnego etryngitu i wystąpienia reakcji alkalia-krzemionka ASR (*alkali silica reaction*).

Przeprowadzone badania potwierdzają możliwość rozróżnienia różnych intensywności zielonej barwy na obrazie mikroskopowym w świetle UV a tym samym potwierdzają możliwość określania stosunku wodno-cementowego (w/c), a w przypadku stosowania dodatku popiołów – stosunku w/s, wykorzystując prawidłowo wykonane szlify wzorcowe. Ponadto możliwe było ocenienie mikrostruktury betonu z dodatkiem i bez dodatku popiołu fluidalnego poddanego reżimowi zamrażania i odmrażania oraz sprawdzenie mrozoodporności betonu lub jej braku na podstawie analizy cienkich szlifów betonowych.

2. Trwałość mrozowa betonów z popiołem fluidalnym

Popiół fluidalny w odróżnieniu od konwencjonalnego popiołu lotnego krzemionkowego jest szczególnym produktem odpadowym ze spalania węgla. Głównym czynnikiem wpływającym na zmiany we właściwościach fizycznych i mineralogicznych tych popiołów jest obniżona temperatura spalania paliwa do ok. 850°C oraz stosowanie sorbentów (wapień lub dolomit), które wiążą tlenki siarki. Popioły z kotłów fluidalnych charakteryzują się bardzo dużą, rozwiniętą powierzchnią właściwą oraz wysoką zawartością aktywnych pucolanowo tlenków SiO₂ i Al₂O₃ [4]. W odróżnieniu od kulistych ziaren popiołu lotnego, ziarna popiołu fluidalnego są kanciaste. Popioły te będące mieszaniną produktów odpopielania spalin i pozostałości sorbentów często zawierają nadmierne ilości SO₃ i CaO, a także wykazują wysokie straty prażenia, co wg normy PN-EN 450 [5] dyskwalifikuje je jako materiał stosowany w budownictwie.

Z uwagi na niedawne pojawienie się nowych technik spalania węgla a co za tym idzie nowych popiołów, informacji na temat trwałości mrozowej betonu wykonanego z dodatkiem popiołu fluidalnego nie jest wiele. Betony wykonane z aktywowanym popiołem fluidalnym w ilości od 14% ÷ 20% wykazały odporność na 100 cykli zamrażania i odmrażania wg PN-88/B-06250, [8]. Zieliński [9] badał mrozoodporność betonów napowietrzonych z dodatkiem popiołu fluidalnego – 20%, 30% i 40% zastąpienia cementu CEM I 32,5 R. Próbkę zamrażane i odmrażane oraz próbki przebywające w wodzie wykazały zbliżone wytrzymałości na ścislenie po 160 cyklach. W betonach z 30% i 40% zastąpieniem cementu przez popiół

fluidalny widoczny był niewielki wzrost wytrzymałości na ściskanie próbek poddanych mrożeniu, w stosunku do próbek porównawczych.

Badania [11] odporności na powierzchniowe łuszczenie betonów napowietrzonych z 20%, 30% i 40% zastąpieniem cementu CEM I 32,5 R przez popiół fluidalny, wykazały, że jedynie beton bez popiołu posiadał bardzo dobrą odporność na powierzchniowe łuszczenie, natomiast niedopuszczalną beton z 40% zawartością popiołu. Również betony z 30% zawartością popiołu okazały się nieodporne na działanie mrozu w obecności 3 % roztworu chlorku sodu. Wyniki wykazują, że zwiększanie zawartości popiołu fluidalnego w betonie powoduje proporcjonalne zmniejszenie odporności betonów na łuszczenie w obecności roztworu soli odladzającej.

W referacie przedstawiono wyniki badania mrozoodporności i odporności na powierzchniowe łuszczenie betonów wykonanych z dwoma rodzajami popiołów fluidalnych a także zaprezentowano analizę cienkich szlifów betonowych oglądanych w świetle przechodzącym, spolaryzowanym oraz świetle ultrafioletowym pod kątem oceny trwałości mrozowej betonów z popiołem fluidalnym.

3. Opis przeprowadzonych badań

3.1. Badane betony

Do badań wykorzystano betony podstawowe bez dodatku popiołu fluidalnego a także betony z 15 i 30 procentowym zastąpieniem cementu przez popiół fluidalny pochodzący z elektrociepłowni Katowice (oznaczono C15K i C30K) i elektrowni Turów (C15T i C30T). Popiół fluidalny z elektrociepłowni Katowice jest produktem odpadowym ze spalania węgla kamiennego, natomiast z elektrowni Turów – węgla brunatnego. W publikacjach [4, 12] dokładnie opisano skład chemiczny i fizyczny badanych popiołów, przedstawiono dla porównania skład cementu portlandzkiego CEM I i popiołu lotnego krzemionkowego a także szczegółowo opisano skład napowietrzonych betonów. Betony napowietrzane wykonano przy stałym stosunku wodno-spoiwowym, wynoszącym 0,45, na kruszywie otoczkowym frakcji 2-8 mm i 8-16 mm.

3.2. Metody określania trwałości mrozowej betonów

Mrozoodporność zbadano wg metody zwykłej zgodnie z normą PN-V-83002, [13]. Badanie mrozoodporności polegało na poddaniu 6 próbek betonowych z każdej serii nasączonych wodą, cyklem zamrażania (4 h w temp. $-18\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$) i odmrażania (2-4 h w temperaturze $+18\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$). Kolejnych sześć próbek przetrzymywano w wodzie w charakterze świadków przez cały czas badania odporności na działanie mrozu.

Odporność na powierzchniowe łuszczenie przeprowadzono wg normy PKN-CEN/TS 12390-9:2007, [16] metoda *slab test*. Badanie to polegało na określeniu masy złuszczonego materiału z górnej powierzchni próbki po 7, 14, 28, 42 i 56 cyklach zamrażania i odmrażania w obecności 3% roztworu NaCl. Jako wynik przyjęto skumulowaną masę złuszczonego materiału po 56 cyklach zamrażania i odmrażania, w kg/m^2 odniesioną do powierzchni próbki.

3.2. Opis przygotowywania cienkich szlifów betonowych

W celu jak najdokładniejszego określenia jakości struktury betonu wykonano cienkie szlify impregnowane żywicą z barwnikiem fluorescencyjnym. Próbki przygotowano zgodnie z zaleceniami normy NT BUILD 361, [2] do analizy w świetle przechodzącym, spolaryzowanym i świetle UV. W Polsce podobna metoda przygotowywania szlifów jest stosowana głównie do badań petrograficznych kamienia naturalnego, [3] i betonu w IPPT.

Próbki przed badaniem mrozoodporności i zarówno przed jak i po badaniu odporności na powierzchniowe łuszczenie były cięte na mniejsze kawałki i następnie impregnowane.

Natomiast próbki po badaniu mrozoodporności, ze względu na swój stan były impregnowane w całości i później cięte. Do impregnacji próbek zastosowano żywicę epoksydową Conpox Resin BY 158 wymieszaną z żółtym barwnikiem fluorescencyjnym EpoDye. Wcześniej wysuszone próbki umieszczono w grubej, szczelnej, przezroczystej foliowej torbie w warunkach niskiego ciśnienia w komorze próżniowej. Wewnątrz przy pomocy pompy próżniowej wytworzone było ciśnienie – 1 bar. W wyniku różnicy ciśnień panujących wewnątrz i na zewnątrz komory próżniowej następował przepływ żywicy epoksydowej wymieszanej z barwnikiem fluorescencyjnym i z utwardzaczem Conpox Hardener HY 2996 z pojemnika do torby z próbkami. Proces impregnacji trwał ok. 30 min, aby umożliwić wniknięcie żywicy w strukturę betonu i wypełnienie wszelkich defektów, jednak na tyle krótko, aby nie doprowadzić do związania żywicy przed wyjęciem próbek z torby. Po impregnacji próbki wyjęto z żywicy i umieszczono w komorze klimatyzacyjnej. Po stwardnieniu żywicy próbki były przycinane do wymiarów ok. 40x20x10 mm. Następnie do jednej z powierzchni próbek przyklejono tzw. szkiełko robocze i polerowano przeciwległą powierzchnię. Do tak przygotowanej powierzchni za pomocą specjalnego kleju przyklejono szkiełko podstawkowe. Dalej część próbki ze szkiełkiem roboczym została odcięta, tak aby próbka na szkiełku podstawkowym miała grubość ok. 1 mm. Później szlifowano próbki do grubości 0,05 mm i dalej polerowano aż do osiągnięcia przez nie wymaganej grubości cienkiego szlifów tj. 0,020 - 0,025 mm. Po sprawdzeniu poprawności wykonania cienkich szlifów, poprzez ocenę barwy kwarcu w próbkach betonowych w mikroskopie optycznym przy świetle przechodzącym, na próbki naklejono szkiełka nakrywkowe, [1].

4. Wyniki badań

4.1 Trwałość mrozowa betonów

Po 200 cyklach zamrażania-odmrażania obniżenie wytrzymałości na ściskanie próbek C0 bez popiołu lotnego po cyklach zamrażania-odmrażania w stosunku do próbek świadków przetrzymywanych w wodzie wynosiło 3,3 %, natomiast dla pozostałych próbek serii C obniżenie wytrzymałości nie przekraczało wartości ok. 3 %. Spadek wytrzymałości uzyskany dla próbek C15K był porównywalny ze spadkiem wytrzymałości uzyskanym dla próbek C15T. Dla serii próbek C30K stwierdzono wzrost wytrzymałości wynoszący ok. 2 %. Podobny wynik uzyskano również dla serii C30T. Zmiana masy próbek nie przekraczała 1 %.

Na podstawie wyników badań można stwierdzić, że beton napowietrzony z dodatkiem popiołów lotnych fluidalnych jest odporny na mróz. Po 200 cyklach zamrażania-odmrażania beton wykazywał niewielką zmianę wytrzymałości na ściskanie w porównaniu do próbek świadków przetrzymywanych w wodzie, niezależnie od źródła pochodzenia popiołu oraz ilości dodanego popiołu.

Po 56 cyklach zamrażania i rozmrażania w 3% roztworze NaCl betony z 30% zawartością popiołu fluidalnego, zarówno z Katowic jak i z Turowa wykazały gwałtowny spadek masy już po 7 cyklach zamrażania/odmrażania. Po 28 cyklach zamrażania-odmrażania przerwano badanie betonów serii C30K z uwagi na znaczne przekroczenie dopuszczalnego limitu masy złuszczeń, 1 kg/m². Po 35 cyklach betony serii C30T również przekroczyły dopuszczalną wartość graniczną. Betony obu serii C15T i C15K z 15% zawartością popiołu fluidalnego wykazały zbliżony ubytek masy, wynoszący po 56 cyklach ok. 0,6 kg/m². Najlepsze wyniki odnośnie do odporności na powierzchniowe łuszczenie wykazał beton C0 bez dodatku popiołów.

Według kryterium zawartego w PN-EN 1338 [17], PN-EN 1339 [18] i PN-EN 1340 [19] wszystkie betony z wyjątkiem betonów z 30% zawartością popiołu fluidalnego z Katowic wykazały odporność na powierzchniowe łuszczenie po 28 cyklach w obecności soli stosowanych do odładzania nawierzchni.

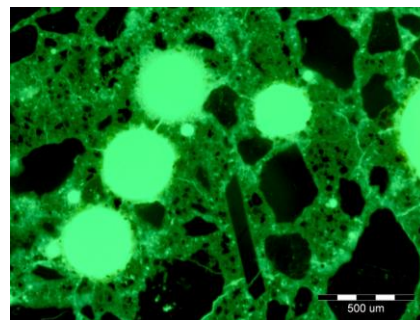
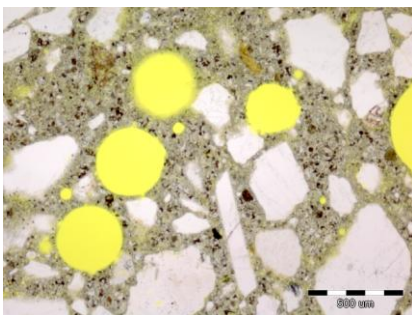
Jednak, gdyby posłużyć się skalą oceny betonu wg normy SS 13 72 44 [10] (klasa bardzo dobra, dobra, dopuszczalna i niedopuszczalna), to tylko beton C0 tj. bez dodatku popiołów fluidalnych znajduje się w klasie dobrej. Wszystkie betony wykonane z popiołem fluidalnym z Turowa i z Katowic znalazły się w klasie niedopuszczalnej.

Na podstawie wyników badań serii C można stwierdzić, że beton napowietrzony z dodatkiem popiołów fluidalnych nie jest odporny na powierzchniowe łuszczenie.

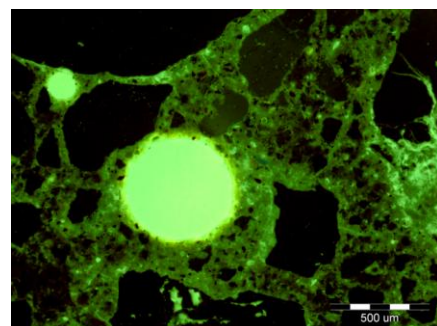
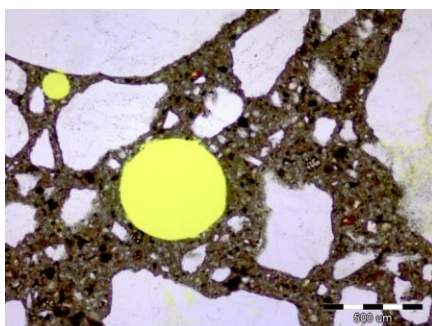
4.2 Analiza cienkich szlifów

Analizę cienkich szlifów betonowych przeprowadzono za pomocą mikroskopu optycznego Olympus BX 51 połączonego z kamerą cyfrową oraz oprogramowaniem do pomiarów. Mikroskop wyposażony był w lampę halogenową o mocy 100 Wat do obserwacji w świetle przechodzącym. Obserwacje przeprowadzono w świetle spolaryzowanym (skrzyżowane nikole i równoległe nikole) oraz w świetle UV.

Przed określeniem wielkości współczynnika wodno-spoiwowego sprawdzono jakość przygotowanych cienkich szlifów na podstawie barwy kwarcu. Żądana grubość szlifu – od 20 do 25 mikrometrów jest niezbędna do poprawnej oceny wielkości współczynnika w/s. Sprawdzone także, czy na danym szlifie nie występują obszary skarbonatyzowanego betonu, gdyż karbonatyzacja powoduje uzyskanie zaniżonego wyniku. Skontrolowano także obecność portlandytu, gdyż zmienia on porowatość kapilarną a ta z kolei wpływa na wielkość w/s.



Fot. 1. Beton C0 przed badaniem mrozodporności; pow. 40x, w świetle przechodzącym, przy równoległych nikołach (lewe zdjęcie), w świetle UV (prawe zdjęcie)

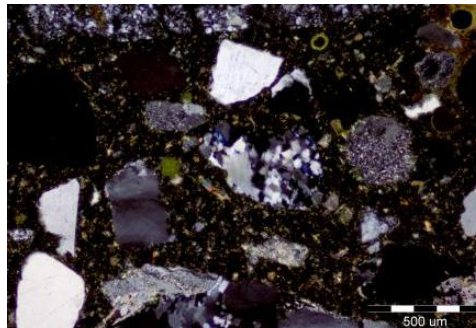


Fot. 2. Beton C30K przed badaniem mrozodporności; pow. 40x, w świetle przechodzącym, przy równoległych nikołach (lewe zdjęcie), w świetle UV (prawe zdjęcie)

Ocenę wielkości współczynnika wodno-spoiwowego przeprowadzono w świetle UV, przy powiększeniu 40x i 100x. Na podstawie porównania intensywności zabarwienia w badanych cienkich szlifach z próbkami wzorcowymi (standardami od w/s=0,35 do w/c=0,7), a także oceniając morfologię $\text{Ca}(\text{OH})_2$ – wielkość, ilość i rozkład portlandytu oraz stopień zhydratyzowania ziarn cementu określono wielkość współczynnika wodno-spoiwowego. Stwierdzono, że w/s maleje wraz ze zwiększeniem zawartości popiołu fluidalnego. W betonie C0, bez popiołu fluidalnego zaczyn jest równomiernie zhydratyzowany natomiast w betonie

z 30% zawartością popiołu fluidalnego widoczne są obszary bardziej i mniej zhydratyzowane – światło UV, fot. 1 i fot. 2. Dla betonu C0 współczynnik w/s określono jako równy 0,43 natomiast dla betonu C30K - w przedziale od 0,39 do 0,44; fot. 1 i fot. 2.

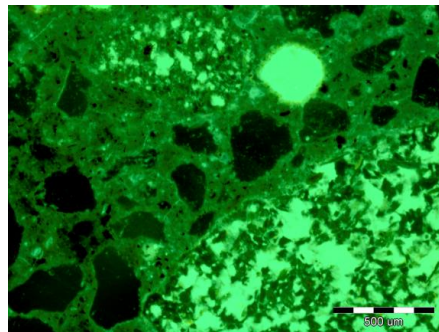
Z obserwacji mikrostruktury betonów na cienkich szlifach przy świetle przechodzącym spolaryzowanym przy równoległych nikolach wynika, że cement nie zawierał dodatków mineralnych, natomiast wyraźnie widoczne są niespalone części węgla, w betonach zawierających popiół fluidalny, fot. 1 i fot. 2. Zawartość niespalonych części węgla rośnie wraz z zawartością popiołu fluidalnego w betonie. Zauważono także, że więcej pozostałości z niespalonego węgla występuje w betonach z popiołem z Katowic w porównaniu do betonów z popiołem z Turowa. W betonach zawierających popiół fluidalny zauważono zwiększoną ilość niezhydratyzowanych ziarn cementu, w porównaniu do betonu bez dodatku popiołu. Na cienkich szlifach betonowych w świetle spolaryzowanym i UV w betonie bez dodatku popiołu fluidalnego widać zbliżonej wielkości – średnicy ok. 300 mikrometrów pory powietrzne, fot. 1. Natomiast w betonach z popiołem fluidalnym fot. 2, pory powietrzne są większe niż w betonie C0, ponad 450 μm .



Fot. 3. Beton C0, pow. 40x, obraz w świetle przechodzącym spolaryzowanym, skrzyżowane nikole

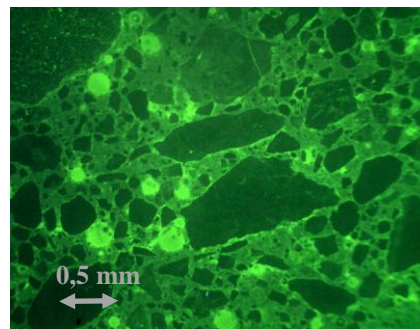
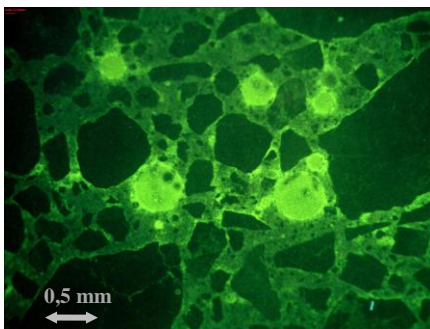
Analizę petrograficzną kruszywa przeprowadzono w świetle przechodzącym spolaryzowanym przy skrzyżowanych nikolach. Stwierdzono, że jako kruszywo drobne zastosowano piasek kwarcowy składający się w większości z kwarcu oraz pojedynczych ziaren granitu, zbudowanych z kwarcu, miki i skalenia, fot. 3. W kruszywie grubym – żwir, widać ziarna zbudowane w przeważającej części z kwarcu, oraz skalenia a także ziarna riolitu i piaskowca.

Na obrazach w świetle UV zauważono, że kruszywo grube charakteryzuje się dużą porowatością, jednak jest to tzw. porowatość zamknięta, która nie powinna mieć wpływu na cykliczne zamrażanie i odmrażanie, fot. 4.

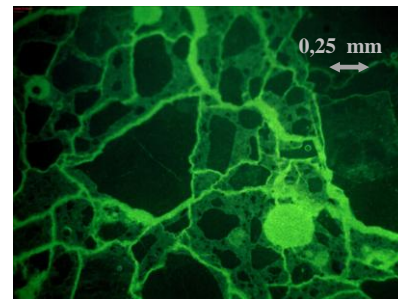
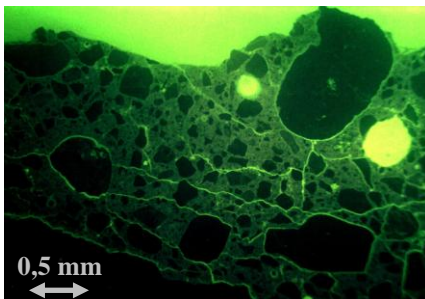


Fot. 4. Beton C0 (lewe zdjęcie) i B30K (prawe zdjęcie), pow. 40x, porowate kruszywo żwirowe widoczne na cienkich szlifach w świetle UV

Na cienkich szlifach wykonanych na betonach poddanych cyklicznemu zamrażaniu i odmrażaniu, także z równoczesnym działaniem NaCl, fot. 5 i fot. 6, widoczne są różnice w mikrostrukturze betonu bez dodatku oraz w betonie z zastąpieniem 30% cementu przez popiół fluidalny z Katowic. Beton C0 nie wykazał pęknięć w strukturze zaczynu jedynie osłabienie strefy kontaktowej między zaczynem a kruszywem (większa porowatość ITZ pod kruszywem grubym) natomiast w betonie C30K dobrze widoczna jest siatka spękań charakterystyczna dla zniszczenia mrozowego. Betony z 30% dodatkiem popiołu fluidalnego na obrazach cienkich szlifów wykazują duże zniszczenia mrozowe to jednak wg normy PN-V-83002 są one mrozo odporne a nawet wykazują przyrost wytrzymałości na ściskanie w porównaniu do próbek świadków. Prawdopodobnie przy określaniu wytrzymałości na ściskanie próbek po mrożeniu, rysy powstałe wskutek cyklicznego zamrażania i odmrażania, uległy zasklepieniu pod działaniem siły ściskającej i nie miały wpływu na końcowy wynik badania.



Fot. 6. Beton C0 w świetle UV po badaniu: odporności na powierzchniowe łuszczenie (lewe zdjęcie), mrozo odporności (prawe zdjęcie)



Fot. 5 Beton C30K w świetle UV po badaniu: odporności na powierzchniowe łuszczenie (lewe zdjęcie), mrozo odporności (prawe zdjęcie)

5. Wnioski

Przeprowadzone badania laboratoryjne wykazały, że zastąpienie cementu przez popiół fluidalny pogarsza odporność betonu na powierzchniowe łuszczenie i zarazem nie pogarsza jego mrozo odporności.

Na podstawie obrazów cienkich szlifów betonowych przeprowadzono analizę mikrostruktury napowietrzonych betonów z popiołem fluidalnym. Stwierdzono, że rzeczywista wielkość współczynnika wodno-spoiwowego jest wyższa w betonie bez popiołu fluidalnego niż w betonach z dodatkiem popiołu. Ponadto, opisano wielkość i rozmieszczenie porów powietrznych w betonach, wskazując na beton bez dodatku popiołu jako poprawnie napowietrzony.

Betony z dodatkiem popiołu fluidalnego okazały się mrozo odporne zgodnie z założeniami normy [13], jednak na obrazach cienkich szlifów ich mikrostruktura jest zniszczona działaniem cyklicznej ujemnej temperatury. W zaczynie widoczna jest siatka

spękań charakterystyczna dla zniszczenia mrozowego. Zalecane jest sprawdzenie mrozoodporności betonów z dodatkiem popiołu fluidalnego wg metody opartej na pomiarze współczynnika sprężystości, np. CEN/TR 15177:2006[14] lub ASTM C 666[15].

Prawdopodobną przyczyną zniszczenia betonów przy cyklicznym zamrażaniu i odmrażaniu w obecności NaCl jest porowate kruszywo grube. Badanie przeprowadzone wg normy [16] zostało wykonane na ciętej powierzchni próbki, więc woda z roztworem soli wniknęła głębiej do betonu poprzez pory w kruszywie grubym i rozpoczęła proces degradacji struktury betonu.

6. Publikacje cytowane

- [1] Józwiak-Niedźwiedzka D., Tucholski Z., Wiadukt żelbetowy z początków XX wieku – analiza struktury stuletniego betonu, Drogi i Mosty, w druku
- [2] NT BUILD 361, Edition 2, 1999, Concrete, Hardened: Water-Cement Ratio
- [3] PN-EN 12407: 2007, Metody badań kamienia naturalnego. Badania petrograficzne
- [4] Łagosz A., Małolepszy J., Śliwiński J., Tracz T., Wykorzystanie popiołów fluidalnych jako dodatku mineralnego do betonów, Piąta Konferencja „Dni Betonu – Tradycja i Nowoczesność”, Wisła, 13 – 15.10. 2008, 719-727
- [5] PN-EN 450-1:2006, Popiół lotny do betonu. Definicje, specyfikacja i kryteria zgodności
- [6] Raport wewnętrzny, Popioły fluidalne, Energomar-Nord, Przedsiębiorstwo Usługowo-Inwestycyjne Budownictwa i Energetyki Sp. z o.o., 1998
- [7] PN-88/B-06250, Beton zwykły
- [8] Glinicki M. A., Zastosowanie aktywowanego popiołu lotnego z kotłów o spalaniu fluidalnym Flubet® jako dodatku do betonów, Targi Energetyki i Ochrony Środowiska, ECOENERGIA 2002, Gdańsk
- [9] Zieliński M., Effects of FBC fly ash on mechanical properties and durability of concrete, US-Poland Workshop on Diagnostics of Concrete Materials and Structures for Infrastructure Facilities, Warsaw, May, 2004, pp. 204
- [10] SS 13 72 44, Concrete testing—hardened concrete—Scaling at Freezing, Swedish Standards
- [11] Glinicki M. A., Zieliński M., Frost salt scaling resistance of concrete containing CFBC fly ash, Materials and Structures, 2009, 42 (7), 993-1002
- [12] Józwiak-Niedźwiedzka D., Effect of fluidized bed combustion fly ash on the chloride resistance and scaling resistance of concrete, Concrete in Aggressive Aqueous Environments, Performance, Testing and Modeling, 02-05 June 2009, Toulouse, France, RILEM proceedings PRO 63, vol. 2, 556-563
- [13] PN-V-83002:1999, Lotniskowe nawierzchnie z betonu cementowego - Wymagania ogólne i metody badań
- [14] CEN/TR 15177:2006, Testing the freeze-thaw resistance of concrete. Internal structural damage
- [15] ASTM C 666:2008, Standard Test Method for Resistance of Concrete to Rapid Freezing and Thawing
- [16] PKN-CEN/TS 12390-9:2007, Testing hardened concrete - Part 9: Freeze-thaw resistance - Scaling
- [17] PN-EN 1338:2005, Betonowe kostki brukowe - Wymagania i metody badań
- [18] PN-EN 1339:2005, Betonowe płyty brukowe - Wymagania i metody badań
- [19] PN-EN 1340:2004, Krawężniki betonowe - Wymagania i metody badań