



WALDEMAR PICHÓR, *pichor@agh.edu.pl*
Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie

WYKORZYSTANIE ZAPRAW CEMENTOWYCH Z DODATKIEM GRAFITU DO MONITORINGU NAPRĘŻEŃ I TEMPERATURY

APPLICATION OF CEMENT MORTARS WITH GRAPHITE ADDITION AS TEMPERATURE AND STRESS SENSORS

Streszczenie W pracy przedstawiono wyniki badań zapraw cementowych z dodatkiem grafitu odpadowego, które wykorzystać można do monitoringu stanu obiektów budowlanych. W celu kompensacji zwiększenia współczynnika przewodzenia ciepła zapraw zastosowano dodatek lekkiego wypełniacza w postaci mikrosfer glinokrzemianowych. Dzięki wprowadzeniu przewodzących prąd cząstek w ilości przekraczającej próg perkolacji uzyskano znaczne (o kilka rzędów) obniżenie rezystywności zapraw, której wartość dodatkowo zmienia się monotonicznie w funkcji obciążeń. Zjawisko to można wykorzystać do monitoringu naprężeń. Drugim efektem związanym z wprowadzeniem grafitu powyżej progu perkolacji jest zdolność generacji napięcia proporcjonalnego do różnicy temperatur (efekt Seebecka). Mimo niewielkiej wartości napięcia, efekt ten wykorzystać można do monitoringu temperatury przegród budowlanych.

Abstract The possibility of using the cement mortars with waste graphite addition as temperature and stress sensors are presented in this paper. Compensation of higher thermal conductivity of such mortars was made by addition of cenospheres from coal ash as lightweight filler. Incorporation of graphite powder to cement mortars above percolation threshold leads to drastically drop of electrical resistivity, which is additionally depending on external stress. The second effect of graphite addition in amount above percolation threshold is ability to generate the Seebeck voltage. This effect may be use to monitoring the temperature of building structures e.g. walls.

1. Wprowadzenie

Zaprawy cementowe są materiałami kompozytowymi, których właściwości jest stosunkowo łatwo modyfikować poprzez stosowanie różnego rodzaju dodatków i domieszek. Zaprawy posiadają szereg cech, dzięki którym spełniają podstawowe zadania w obiekcie budowlanym. Zależnie od przeznaczenia różne ich właściwości np. wysoka wytrzymałość, niski współczynnik przewodzenia ciepła, duża przyczepność do podłoża nabierają pierwszorzędno znaczenia. W większości przypadków od tego rodzaju materiałów wymaga się spełnienia wielu kryteriów jednocześnie, a jedną z metod osiągnięcia założonych parametrów jest modyfikacja ich właściwości właśnie poprzez wprowadzenie dodatków. Dodatki te mogą również nadawać zaprawom całkiem nowe cechy np. dobre przewodnictwo elektryczne, czyniąc z nich kompozyt wielofunkcyjny. Jednocześnie wykorzystanie wszelkiego rodzaju odpadów przemysłowych jako dodatków do zapraw i betonów stale ulega zwiększeniu. Działanie takie z jednej strony przyczynia się do poprawy stanu środowiska naturalnego, a z drugiej daje szansę stosować połączenia bardzo różnych materiałów, czasami uzyskując nowe cechy użytkowe modyfikowanych materiałów. Jako dodatki stosuje się odpady

z bardzo różnych źródeł: np. popioły i żużle metalurgiczne, ścier drzewny, odpady przemysłu włókienniczego, tworzyw sztucznych z recyklingu (np. pociętych butelek PET) czy wreszcie dodatków przewodzących prąd elektryczny, a w szczególności grafitu odpadowego [1÷3]. Mimo powszechnej dostępności grafitu odpadowego zastosowanie go jako dodatku do zapraw i betonów napotyka duże trudności, a jego stosowanie możliwe jest w bardzo ograniczonym zakresie z uwagi na brak zwilżalności przez wodę oraz płytkowy pokrój ziaren. Biorąc jednak pod uwagę fakt, że dodatek grafitu w zasadniczy sposób zmienia cechy elektryczne takich zapraw, pojawia się możliwość wykorzystania tak modyfikowanych zapraw do monitoringu stanu naprężeń i temperatury obiektów budowlanych. Zasadność prowadzenia badań w tym kierunku można traktować jako ekonomicznie uzasadnioną alternatywę do kompozytów cementowych z włóknami węglowymi lub stalowymi [4÷6]. Jednocześnie jest to próba utylizacji dość uciążliwego odpadu wychwytywanego przez system odpylania w zakładzie przemysłowym produkującym elektrody grafitowe dla przemysłu metalurgicznego. Odpad w formie pyłu grafitowego generowany jest w procesie szlifowania elektrod.

Wprowadzenie grafitu do zaprawy, w stosunkowo dużych ilościach, bezpośrednio wiąże się z podwyższeniem jej przewodnictwa cieplnego, co – w przeważającej większości przypadków – jest niepożądane. Niemniej jednak istnieją aplikacje, w których zwiększone przewodnictwo cieplne zapraw i betonów jest zaletą. Przykładowo wymienić tu można wymienniki ciepła w palach fundamentowych czy zaprawy do mocowania sond temperaturowych w masywnych obiektach betonowych.

W przypadku wykorzystania napięcia termoelektrycznego do pomiaru temperatury istotnym problemem jest zapewnienie na tyle dużego gradientu temperatury po obu stronach materiału, aby efekt ten był mierzalny. Zaprawy cementowe w zdecydowanej większości wypadków są materiałem stosowanym w stosunkowo cienkiej warstwie (1÷2 cm), zatem wykorzystanie efektu Seebecka do monitoringu temperatury dodatkowo napotyka trudność ze względu na mały gradient temperatur możliwy do osiągnięcia w zwykłej zaprawie w warunkach eksploatacji budynku. Różnica temperatur na grubości zaprawy przede wszystkim zależy od jej współczynnika przewodzenia ciepła. Polepszenie izolacyjności termicznej zaprawy pozwala nawet w cienkiej warstwie osiągnąć wystarczający gradient temperatury do uzyskania mierzalnego napięcia Seebecka. To jest zasadniczy cel obniżania gęstości objętościowej zapraw generujących napięcie termoelektryczne, niemniej dodatkowo niweluje się pogorszenie izolacyjności ze względu na dobre właściwości przewodzenia ciepła przez grafit.

W celu poprawy izolacyjności można wprowadzić lekkie wypełniacze, np. perlit ekspandowany [7÷9], granule styropianowe czy mikrosfery glinokrzemianowe [10÷11] zastępując nimi część piasku. Z uwagi jednak na znaczne pogorszenie właściwości reologicznych zapraw poprzez wprowadzenie do mieszanki pyłu grafitowego uzasadniony jest wybór takiego lekkiego wypełniacza, który dodatkowo, w możliwie małym stopniu pogorszy urabialność. Z tego punktu widzenia odpowiednim dodatkiem zmniejszającym przewodnictwo cieplne zapraw są mikrosfery glinokrzemianowe z popiołów lotnych, cechujące się stosunkowo gładką powierzchnią i znikomą nasiąkliwością. Dzięki takiej kombinacji, w której mikrosfery zastępują część piasku, a grafit zastępuje część cementu można uzyskać kompozyt o stosunkowo dobrej izolacyjności cieplnej, wystarczających parametrach wytrzymałościowych oraz właściwościach elektrycznych możliwych do wykorzystania np. do pomiaru temperatury ścian czy naprężeń mechanicznych. W celu pomiaru naprężeń mechanicznych wykorzystać można zmianę rezystancji zaprawy w funkcji obciążenia.

Właściwości elektryczne zapraw mogą być zatem z powodzeniem wykorzystane do monitoringu stanu naprężeń krytycznych lub krytycznych obciążeń cieplnych budowli. Na podstawie pomiaru rezystancji lub napięcia termoelektrycznego generowanego przez

zaprawy można wyznaczyć pewne wartości progowe, po przekroczeniu których nieuchronnie dochodzić będzie do awarii budowlanej.

2. Materiały i metody badań

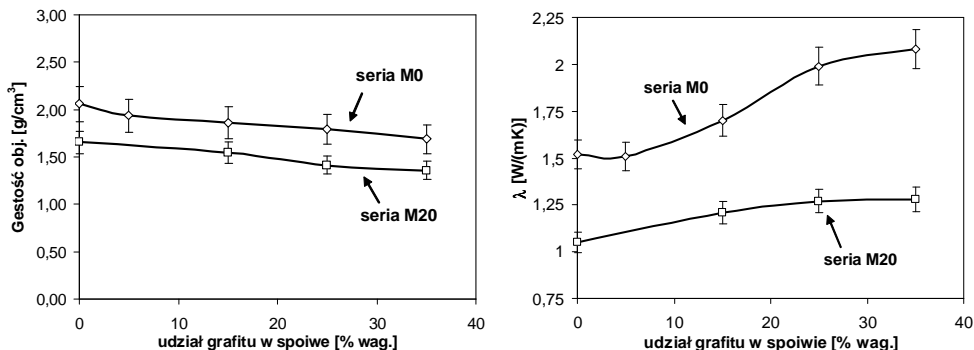
Badaniom poddano stwardniałe zaprawy cementowe w których część cementu zastępował grafit a część piasku mikrosfery glinokrzemianowe odzyskiwane z popiołów lotnych. Grafit wprowadzano do zapraw zastępując część cementu, przy czym wskaźnik w/c odnosił się do sumy suchych składników i we wszystkich przypadkach wynosił 0,50. Udział pyłu grafitowego wynosił odpowiednio 15, 25, 35 i 45% wagowo w stosunku do cementu, przy czym badania właściwości elektrycznych przeprowadzono na próbkach z 35% jego zawartością. Grafit odpadowy pochodził z procesu szlifowania elektrod w zakładach SGL Carbon S.A. w Nowym Sączu. Wykorzystano frakcję ziarnową poniżej $0,063\ \mu\text{m}$ uzyskaną na drodze separacji sitowej. W celu obniżenia przewodnictwa cieplnego zapraw (seria M20) wykorzystano mikrosfery glinokrzemianowe z popiołów lotnych o dominującej frakcji ziarnowej w przedziale $100\div 300\ \mu\text{m}$, średniej gęstości pozornej około $800\ \text{kg/m}^3$ i współczynnika przewodzenia ciepła $0,10\ \text{W/(m}\cdot\text{K)}$. Udział mikrosfer zastępujących część piasku w zaprawach wynosił 20% wagowo. Stosunek wagowy piasku (lub piasku z mikrosferami) do sumy cementu i grafitu wynosił 1:1. Zastosowano piasek kwarcowy o uziarnieniu poniżej $0,5\ \text{mm}$ oraz cement portlandzki CEM I 42,5R. W celu poprawy właściwości reologicznych do wody zarobowej dodano plastyfikator Remicrete SP60 (Schomburg Retmeier) w ilości 1% do sumy cementu i grafitu.

Z zapraw sporządzono płyty o wymiarach $75\times 75\times 15\ \text{mm}$ do badania współczynnika przewodzenia ciepła, oraz beleczki o wymiarach $15\times 15\times 75\ \text{mm}$ do badania wytrzymałości na zginanie i właściwości elektrycznych (pomiar rezystancji) i termoelektrycznych (współczynnika Seebecka). Próbki dojrzewały 28 dni w wodzie. Pomiar współczynnika przewodzenia ciepła przeprowadzono po wysuszeniu próbek do stałej masy i wyszlifowaniu powierzchni. Badania wykonano metodą niestacjonarną tzw. hot-disk, z wykorzystaniem aparatu ISOMET 2104 (Applied Precision Inc.) z głowicami pomiarowymi przeznaczonymi dla materiałów o współczynniku przewodzenia ciepła w zakresie $0,3\div 2,0\ \text{W/(m}\cdot\text{K)}$ i $2,0\div 6,0\ \text{W/(m}\cdot\text{K)}$. Wytrzymałość na zginanie przeprowadzono w próbie trójpunktowego zginania przy rozstawie podpór $60\ \text{mm}$ i szybkości odkształcania $1,0\ \text{mm/min}$. Pomiar rezystancji oraz efektu Seebecka przeprowadzono w prototypowym stanowisku pomiarowym, w którym specjalnie przygotowaną próbkę umieszczono między dwoma płytami o kontrolowanych temperaturach. Temperatura każdej z płyt regulowana i stabilizowana była poprzez niezależny ultratermostat, przy czym dodatkowo rejestrowana była temperatura w miejscu styku próbki z płytą. Na obu końcach każdej próbki wykonano kontakty elektryczne z blachy miedzianej o grubości $0,1\ \text{mm}$, dodatkowo wywinięte na długości około $5\ \text{mm}$ na boczne płaszczyzny próbki i opasane po obwodzie przewodem miedzianym, który zapewniał stabilne połączenie z przewodami pomiarowymi [12]. Pomiarzy zmian rezystancji w funkcji obciążenia wykonano w maszynie wytrzymałościowej QC-508B1 (statycznie, przy prędkości obciążania $1,0\ \text{mm/min}$ oraz dynamicznie. Każdą próbkę obciążano cyklicznie, przy czym ustalono przebieg obciążania według schematu: trapezowy przyrost odkształcania próbki – pierwsza faza obciążania z szybkością $20\ \text{mm/min}$ do poziomu 1% ($0,75\ \text{mm}$) odkształcania wysokości próbki, utrzymanie maksymalnego obciążenia przez $10\ \text{s}$, powrót do poziomu $0,10\ \text{mm}$ względem odkształcania początkowego z szybkością $20\ \text{mm/min}$ i przetrzymanie przez $10\ \text{s}$. Dla każdej próbki wykonano 5 cykli. Maksymalne odkształcenie odpowiadało w przybliżeniu naprężeniu $4\ \text{MPa}$ wywieranemu na próbkę.

Pomiary współczynnika Seebecka (względem miedzi) przeprowadzono każdorazowo po ustabilizowaniu się temperatury mierzonej w punkcie styku próbki z płytami pomiarowymi. Różnica temperatur w czasie pomiarów wynosiła odpowiednio -10, 10, 30 i 50°C względem temperatury odniesienia 20°C. Badania dynamiczne zrealizowano tzw. metodą skoku temperaturowego, która jest typową metodą dla określenia właściwości dynamicznych termopar [13]. Różnica temperatur wynosiła 50°C. Wykonano również obserwacje SEM ziaren grafitu w zaprawie cementowej.

3. Wyniki badań

Na rys. 1 przedstawiono zależność gęstości pozornej oraz przewodnictwa cieplnego próbek zapraw w funkcji udziału grafitu w stosunku do cementu dla serii bez dodatku mikrosfer (M0) oraz z 20% ich udziałem (w stosunku do piasku). Dodatek mikrosfer obniża wartość gęstości pozornej odpowiednio o około 20% w stosunku do zaprawy odniesienia. Wraz z wprowadzeniem dodatkowych ilości grafitu zastępujących cement, gęstość objętościowa zapraw ulega obniżeniu przyjmując minimalne wartości dla 35% wag. grafitu w stosunku do cementu. Spadek gęstości objętościowej jest w przybliżeniu monotoniczny. Związane jest to zasadniczo z dwoma efektami: niższej gęstości grafitu w stosunku do powstałych produktów hydratacji cementu z wodą oraz wprowadzenia dodatkowych ilości powietrza (głównie na granicy kontaktowej grafit-zaczyn cementowy).

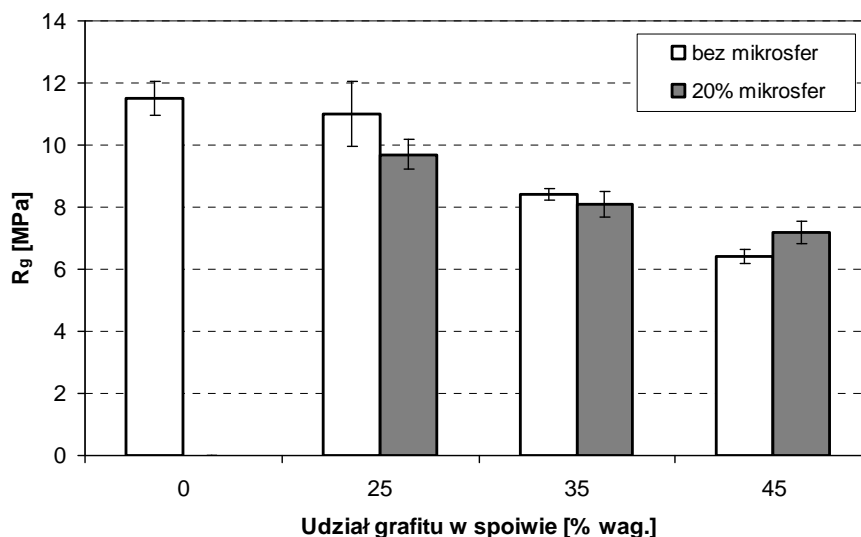


Rys. 1. Zmiana gęstości objętościowej oraz przewodnictwa cieplnego zapraw M0 (bez dodatku mikrosfer) i M20 (z 20% udział mikrosfer) w funkcji udziału grafitu w spoiwie

Współczynnik przewodnictwa cieplnego zapraw silnie zależy od udziału grafitu w spoiwie. Efekt ten szczególnie widoczny jest dla zapraw bez dodatku lekkiego wypełniacza. Wzrost przewodnictwa cieplnego przekracza 30% dla zaprawy z 35% zawartością grafitu. Dodatek mikrosfer glinokrzemianowych ogranicza ten efekt, a obserwowane wartości współczynnika przewodzenia ciepła przyjmują znacznie mniejsze wartości, przy czym wzrost przewodnictwa w funkcji ilości grafitu jest o około połowę mniejszy niż w przypadku próbki bez mikrosfer. Dla próbek M20G35 współczynnik przewodzenia ciepła przyjmuje wartość 1,2 W/(m·K).

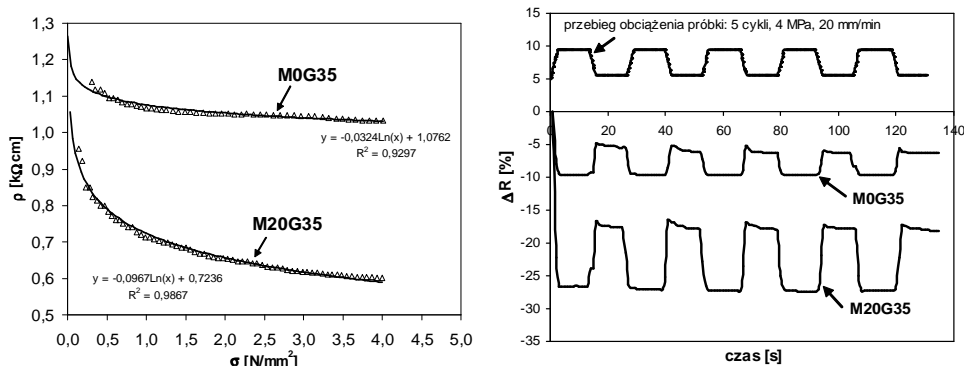
Wprowadzenie lekkiego wypełniacza w postaci mikrosfer związane jest również z pogorszeniem właściwości mechanicznych zapraw. Na rys. 3 przedstawiono zależność wytrzymałości na zginanie zapraw w funkcji udziału pyłu grafitowego w spoiwie. Zwiększanie zawartości grafitu prowadzi do spadku wytrzymałości zapraw. Dla próbek bez dodatku mikrosfer przy 35% zawartości grafitu spadek wytrzymałości na zginanie sięga 40%.

W przypadku zaprawy z 20% dodatkiem mikrosfer zastępujących piasek spadek wytrzymałości wynosi około 25%. Biorąc pod uwagę obserwowane spadki wytrzymałości wprowadzanie dużych ilości pyłu grafitowego jest problematyczne.



Rys. 2. Zmiana wytrzymałości na zginanie zapraw M0 i M20 (20% udział mikrosfer) z funkcji udziału grafitu w spoiwie

To niekorzystne zjawisko kompensowane może być faktem, że przy ilości 35% grafitu w stosunku do cementu (około 16% wag. w zaprawie) przekroczony jest próg perkolacji grafitu. Kompozyt taki posiada zdolność generacji napięcia termoelektrycznego proporcjonalnego do różnicy temperatur (efekt Seebecka).

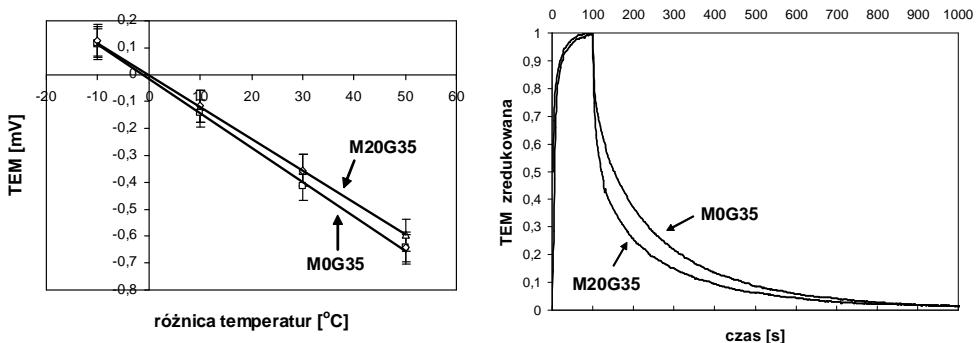


Rys. 3. Zmiana oporu właściwego zapraw M0G35 i M20G35 w funkcji naprężenia ściskającego dla obciążeń statycznych (po lewej) i dynamicznych (po prawej)

Zaprawy z tak dużym udziałem przewodzącego prąd wypełniacza cechują się ponadto znacznie obniżonym (o kilka rzędów) przewodnictwem elektrycznym w stosunku do zapraw niemodyfikowanych. Opór właściwy zapraw bez dodatku mikrosfer (M0G35) wynosił $1,21 \pm 0,30 \cdot 10^3 \Omega \text{cm}$, natomiast w przypadku zaprawy z 20% zawartością mikrosfer w stosun-

ku do piasku (M20G35) jego wartość nie przekraczała poziomu $0,98 \pm 0,13 \cdot 10^3 \Omega \text{cm}$. Efekt Seebecka pojawiający się w zaprawach można wykorzystać do pomiaru temperatury przegród budowlanych, a zmianę oporu elektrycznego w funkcji obciążenia do monitoringu stanu naprężeń. Na rys. 3 (po lewej) przedstawiono zmianę rezystywności próbek zapraw poddanych statycznemu obciążeniu z prędkością 1,0 mm/min. Zaobserwowano logarytmiczną zmianę rezystywności zapraw w funkcji obciążenia, przy czym względna zmiana rezystancji jest większa dla zapraw z dodatkiem mikrosfer, i wynosi odpowiednio około 10% dla obciążenia 4 MPa dla zaprawy bez mikrosfer oraz około 25% dla zaprawy z mikrosferami. W przypadku obciążeń cyklicznych zaobserwowane zmiany rezystancji odpowiadają wymuszonemu przebiegowi obciążeń i przyjmują dość duże wartości, niemniej jednak odpowiadają one zakresowi odkształceń sprężystych próbek. Rejestrowane zmiany rezystancji w badanym zakresie mają charakter odwracalny. Przy większych obciążeniach, bliskich wytrzymałości zapraw, rejestrowaną zmianę rezystancji próbek można wykorzystać do diagnozowania rozwoju spękań w kompozycie cementowym [16, 17].

Na rys. 4 przedstawiono zależność napięcia termoelektrycznego (zredukowanego do jedności) rejestrowanego w czasie ogrzewania jednostronnego próbki M0G35 i M20G35 względem temperatury 20°C . Pomiar przeprowadzono dla różnicy temperatur w zakresie -10 do $+50^\circ\text{C}$ co 20°C . Zakres temperatur wybrano ze względu na potencjalne warunki pracy zapraw cementowych w przegrodzie budowlanej. W obu przypadkach uzyskano liniową zależność zmian napięcia termoelektrycznego w rozpatrywanym przedziale temperatur.

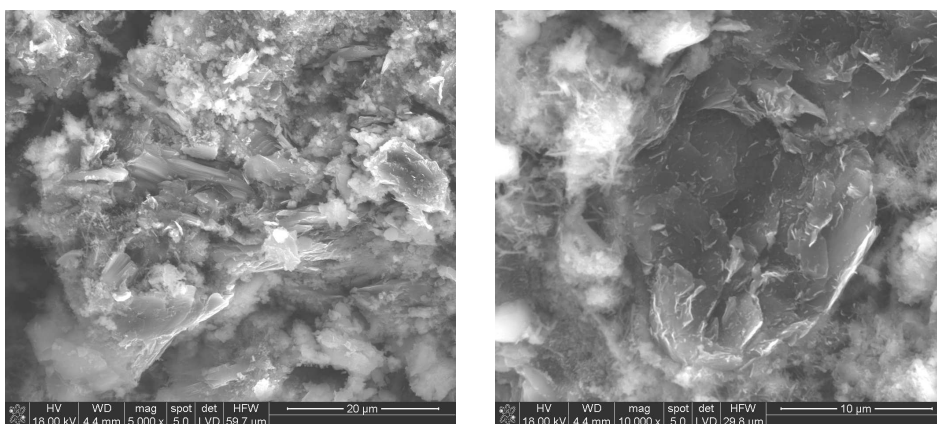


Rys. 4. Napięcie termoelektryczne generowane przez zaprawy M0G35 i M20G35 w funkcji różnicy temperatur oraz dynamiczne zmiany napięcia termoelektrycznego generowane przez zaprawę M0G35 i M20G35 przy wymuszonym skokowo 50°C gradiencie temperatur

Na podstawie uzyskanych wyników określono wartość współczynnika Seebecka badanych kompozytów, która wynosiła średnio $-14 \pm 3 \mu\text{V/K}$ dla próbki M0G35 i $12 \pm 3 \mu\text{V/K}$ dla M20G35, przy czym obserwowane różnice między seriami mieściły się w granicach błędów. Jest to stosunkowo mała wartość i w typowych aplikacjach, gdzie grubość zaprawy cementowej nie przekracza $1 \div 2$ cm możliwy do osiągnięcia gradient temperatury jest bardzo mały. Zmniejszenie wartości współczynnika przewodzenia ciepła zapraw poprzez dodatek mikrosfer powoduje, że gradienty temperatur na stosunkowo niewielkiej grubości warstwy zaprawy są znacznie większe. Dzięki temu, możliwe jest wykorzystanie niewielkiego napięcia Seebecka generowanego przez zaprawy do monitoringu temperatury przegrody. Na rys. 4 (po prawej) przedstawiono odpowiedź badanej próbki na wymuszoną skokową zmianę temperatury jednego końca próbki względem temperatury odniesienia dla różnicy temperatur $+50^\circ\text{C}$. Analogicznie jak w przypadku czujników termoelektrycznych wyznaczono stałą czasową elementu pomiarowego τ_s . Niemniej jednak z uwagi na znaczną masę elementu

poddanego badaniom, jego pojemność cieplną, stosunkowo niską wartość przewodnictwa cieplnego (w porównaniu z metalami) i zmienną wartością współczynnika przejmowania ciepła analityczne wyznaczenie stałej jest obarczone znacznymi błędami. Stałą czasową obliczono na podstawie wyznaczonego czasu osiągnięcia wartości połowicznej $\tau_{0,5}$ dzieląc jego wartość przez wartość 0,693. Szybkość reakcji na zmieniającą się skokowo temperaturę przy nagrzewaniu jest porównywalna w obu przypadkach zapraw cementowej, natomiast przy studzeniu stała $\tau_{0,5}$ jest przeszło dwukrotnie większa dla próbki bez dodatku mikrosfer (M0G35). Przy różnicy temperatur $+50^{\circ}\text{C}$ wartość stałej czasowej zaprawy M0G35 przy studzeniu wynosi 69 s, natomiast dla zaprawy M20G35 – 29 s. Różnice te wiązać należy ze zmienionym przewodnictwem i pojemnością cieplną zapraw z uwagi na wprowadzony dodatek lekkiego wypełniacza.

Na rys. 5 przedstawiono obserwacje SEM ziaren grafitu w zaprawie. Widoczne laminarne ułożenie krystalitów grafitu oraz stosunkowo zwarta strefa otaczająca ziarno grafitu. Przy znacznym rozdrobnieniu grafitu brak jest widocznych dużych obszarów nieciągłości strefy kontaktowej, wynikających ze złego zwilżania grafitu przez wodę.



Rys. 5. Obrazy SEM ziaren grafitu w matrycy zaprawy cementowej

4. Podsumowanie i wnioski

Na podstawie przeprowadzonych badań można stwierdzić, że duży, przekraczający próg perkolacji dodatek pyłu grafitowego pogarsza właściwości mechaniczne, niemniej jednak kompozyty takie posiadają interesujące właściwości elektryczne. Niską rezystywność oraz zdolność do generacji napięcia termoelektrycznego można wykorzystać do monitoringu stanu obiektów budowlanych. Zwiększoną wartość przewodnictwa cieplnego poprawić można poprzez niewielki dodatek mikrosfer glinokrzemianowych. Do monitoringu naprężeń mechanicznych wykorzystać można zmiany oporu elektrycznego zapraw w funkcji wywieranego obciążenia. Dynamiczne zmiany oporu elektrycznego lekkich zapraw z dodatkiem grafitu w zakresie odkształceń sprężystych są odwracalne i w mierzonym zakresie odpowiadają zmianom wymuszonego naprężenia działającego na kompozyt. Względne zmiany oporu są większe dla próbek z dodatkiem mikrosfer. Znaczne zmniejszenie wartości oporu elektrycznego oraz występujący słaby efekt Seebecka wskazują na możliwość wykorzystania tego rodzaju materiałów jako kompozytów wielofunkcyjnych. Dzięki ograniczonemu przewodnictwu cieplnemu przez wprowadzenie lekkiego wypełniacza uzyskiwany gradient temperatury na cienkiej warstwie zaprawy daje możliwość wykorzystania efektu Seebecka

do monitoringu temperatury. Obniżenie współczynnika przewodnictwa cieplnego dodatkowo powoduje, że szybkość reakcji tego rodzaju materiału na zmiany temperatury jest większa. Lekkie zaprawy cementowe z dodatkiem pyłu grafitowego dzięki swojej wielofunkcyjności mogą znaleźć zastosowanie w konstrukcjach tzw. domów inteligentnych np. do monitoringu temperatury przegród budowlanych czy do oceny stanu naprężeń konstrukcji. Dzięki obniżeniu gęstości objętościowej uzyskanej przez wprowadzenie mikrosfer glinokrzemianowych uzyskuje się wzrost czułości zapraw cementowych z dodatkiem grafitu na zmienne bodźce zewnętrzne oddziałujące na materiał.

Cechy elektryczne zapraw dają możliwość ich wykorzystania do diagnozowania stanów krytycznych naprężeń mechanicznych oraz temperatur jakie mogą oddziaływać na konstrukcję budowlaną, zanim nastąpi jej awaria, spowodowana przeciążeniem mechanicznym lub zbyt dużym obciążeniem cieplnym. Konstrukcja zatem nabywa zdolność do ciągłego automonitoringu, umożliwiając tym samym szybkie diagnozowanie jej stanu, a tym samym daje sposobność do natychmiastowego podjęcia działań zapobiegających awarii budowlanej.

Literatura

1. Patent USA nr 5447564 Conductive cement-based compositions (1995).
2. Nishikawa T., Takatsu M.: Fracture behavior of hardened cement paste incorporating mineral additions, *Cement and Concrete Research* 25 (1995) 1218÷1224.
3. Guan H., Liu S., Duan Y., Cheng J.: Cement based electromagnetic shielding and absorbing building materials, *Cement and Concrete Composites* 28 (2006) 468÷474.
4. Sun M., Li Z., Mao Q., Shen D.: Study on the Hole Conduction Phenomenon in Carbon Fiber-Reinforced Concrete, *Cement and Concrete Research* 28 (1998) 549÷554.
5. Wen S., Chung D.D.L.: Seebeck effect in carbon fiber-reinforced cement, *Cement and Concrete Research* 29 (1999) 1989÷1993.
6. Wen S., Chung D.D.L.: Seebeck effect in steel fiber reinforced cement, *Cement and Concrete Research* 30 (2000) 661÷664.
7. Gólek Ł., Pichór W.: Modyfikowane zaprawy izolacyjne na bazie perlitu, *Mat. konf. Dni Betonu* 2006, Wisła (2006) 555÷568.
8. Siva L.M., Ribeiro R.A., Labrincha J.A., Ferreira V.M.: Role of lightweight fillers on the properties of a mixed-binder mortar, *Cement and Concrete Composites* 32 (2010) 19÷24.
9. Demirboğa R., Gül R.: The effects of expanded perlite aggregate, silica fume and fly ash on the thermal conductivity of lightweight concrete, *Cement and Concrete Research* 33 (2003) 723÷727.
10. Pichór W., Petri M.: Właściwości kompozytów cementowo-włóknistych z dodatkiem mikrosfer, *Kompozyty/Composites*, 4 (2004) 319÷325.
11. Suryavanshi A.K., Swamy R.N.: Development of lightweight mixes using ceramic microspheres as fillers, *Cement and Concrete Research* 32 (2002) 1783÷1789.
12. Pichór W.: Dynamiczne właściwości elektryczne lekkich zapraw cementowych z dodatkiem grafitu odpadowego. *Kompozyty* 10, 2 (2010) 175÷180.
13. Michalski L., Eckersdorf K.: *Pomiary temperatury*, WNT Warszawa 1986.
14. Chung D.D.L.: Damage in cement-based materials, studied by electrical resistance measurement, *Materials Science and Engineering R* 42 (2003) 1÷40.
15. Bontea D., Chung D.D.L., Lee G.C.: Damage in carbon fiber-reinforced concrete, monitored by electrical resistance measurement, *Cement and Concrete Research* 30 (2000) 651÷659.



FARSHAD RAJABIPOUR, *farshad@psu.edu*

Pennsylvania State University

PHILIP OOI, *ooi@eng.hawaii.edu*

University of Hawaii at Manoa

ALEKSANDRA RADLIŃSKA, *aleksandra.radlinska@villanova.edu*

Villanova University

OCENA USZKODZEŃ NAWIERZCHNI PARKINGOWEJ NA PODBUDOWIE Z KRUSZYWA RECYKLINGOWANEGO

ANALYSIS OF DISTRESSED PAVEMENT SUPPORTED ON A BASE COURSE CONTAINING RECYCLED AGGREGATE

Streszczenie W niniejszej pracy uszkodzona powierzchnia parkingu na wyspie Oahu (Hawaje) poddana została dokładnej analizie w celu ustalenia przyczyn awarii. Na konstrukcję parkingu składały się 51 mm nawierzchnia asfaltowa, 152 mm podbudowa składająca się w 50% z bazaltu, 25% z recyklingowanego asfaltu i w 25% z recyklingowanego betonu, posadowione na dwu metrowej warstwie piasku koralowego. W przeciągu dwóch lat od budowy parkingu zaobserwowano znaczną ilość wybrzuszeń o wysokości 25 mm i średnicy 127 mm. Odkrycie kolejnych warstw odsłoniło białą substancję w miejscach pod wybrzuszeniami. Aby zidentyfikować skład znalezionej substancji, wykorzystano skaningowy mikroskop elektronowy (SEM) wyposażony w czujnik rozproszonej energii (EDS), użyto techniki dyfrakcji promieni rentgenowskich (XRD) oraz fotoakustycznego spektroskopu ramanowskiego. Badania pokazały, iż awaria nawierzchni spowodowana była powstawaniem bayerytu, niestabilnej formy gibbsytu $\text{Al}(\text{OH})_3$, który był produktem korozji aluminium obecnego w zanieczyszczonym kruszywie recyklingowanym.

Abstract This paper presents a forensic investigation on the causes of deterioration of an open parking lot pavement in Oahu, Hawaii. The pavement was composed of a 51-mm-thick asphalt concrete which was supported on a 152-mm-thick base course containing 50% basalt, 25% reclaimed asphalt pavement (RAP) and 25% recycled concrete aggregates (RCA), overlying a 2-m-thick coralline sand layer. A significant number of eruptions (approximately 25 mm high and 127 mm in diameter) had formed within two years after construction. Excavation of pavement in the distressed area revealed formation of a white substance in considerable volumes underneath each eruption and within the base course. To identify its composition, analytical testing of the white substance was performed including scanning electron microscopy (SEM), x-ray energy dispersive spectroscopy (EDS), x-ray diffraction (XRD), and Raman spectroscopy. The results suggested that the cause for distress was the white substance primarily composed of bayerite, a metastable form of gibbsite $\text{Al}(\text{OH})_3$, which was the result of corrosion of aluminum present in recycled aggregate.

1. Wstęp

Wraz ze wzrostem zainteresowania rozwojem zrównoważonym infrastruktury na świecie, wzrasta zainteresowanie ponownym wykorzystaniem kruszywa odzyskanego w procesie recyklingu, jako recyklingowanego kruszywa betonowego; z ang. Recycled Concrete Aggregate, RCA, oraz recyklingowanego kruszywa asfaltowego, z ang. Reclaimed Asphalt Pavement, RAP. Kruszywa te nie tylko pozwalają wykorzystać materiał, który w innym

wypadku zostałyby składowany na wysypisku odpadów, ale także chronią naturalne zasoby materiałów na naszej planecie.

Pierwsze przykłady zainteresowania RCA w Stanach Zjednoczonych Ameryki Północnej pojawiły się w latach 70-tych, ale wzmożone zainteresowanie zastosowaniem RCA nastąpiło dopiero w nowym milenium, kiedy to wzmożone zostały naciski organizacji rządowych i pozarządowych na uważne rozpatrzenie możliwości zastosowania betonu odzyskanego, jako kruszywa zastępującego kruszywo naturalne [1, 2]. Falę zainteresowania bardziej powszechnym zastosowaniem RCA przyniósł największy na świecie projekt wykorzystania betonu odzyskanego z rozbioru lotniska w Denver (Stapleton International Airport). Uzyskany w ten sposób materiał posłużył do budowy sąsiedniego osiedla mieszkaniowego (rys. 1).



Rys. 1. Nieistniejące już lotnisko w Denver: a) widok betonowego pasa startowego lotniska przed rozbiorą, b) widok osiedla powstałego w bezpośrednim sąsiedztwie byłego lotniska, w którym wykorzystano beton z recyklingowanych betonowych płyt lotniska

Podczas gdy zastosowanie recyklingowanego kruszywa niesie ze sobą wiele zalet natury ekonomicznej i ma pozytywny efekt na środowisko naturalne, niedopatrzania w kontroli jakości tego kruszywa prowadzą do zastosowania zanieczyszczonego materiału, które w konsekwencji może prowadzić do przedwczesnych zniszczeń konstrukcji.

Niniejszy artykuł przedstawia ocenę stanu nawierzchni parkingowej wykonanej z asfaltu o grubości 51 mm, na 152 mm podbudowie złożonej w 50% z bazaltu, 25% z recyklingowanego asfaltu i w 25% z kruszywa uzyskanego z recyklingowanego betonu, RCA, na której odnotowano znaczne zniszczenia już po pierwszym roku od czasu ukończenia konstrukcji.

2. Ocena nawierzchni w stanie istniejącym

Na powierzchni jednego z parkingów na wyspie Oahu (Hawaje, USA) zaobserwowano powstawanie wybrzuszeń zaledwie rok po wykonaniu nawierzchni. W momencie pierwotnej oceny stanu nawierzchni (po 1-szym roku), odnotowano ponad 30 wybrzuszeń o średnicy 127 mm, wystających ponad 25 mm ponad poziom terenu (rys 2a). Po dwóch latach od wykonania nawierzchni, liczba wybrzuszeń zwiększyła się do ponad 100.