

Waldemar Pichór

Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Inżynierii Materiałowej i Ceramiki, al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków, Poland
Corresponding author. E-mail: pichor@agh.edu.pl

Otrzymano (Received) 08.02.2010

DYNAMICZNE WŁAŚCIWOŚCI ELEKTRYCZNE LEKKICH ZAPRAW CEMENTOWYCH Z DODATKIEM GRAFITU ODPADOWEGO

Przedstawiono wyniki badań dynamicznych właściwości elektrycznych lekkich zapraw budowlanych z dodatkiem grafitu odpadowego. Niską gęstość pozorną zapraw cementowych uzyskano poprzez dodatek mikrosfer glinokrzemianowych wykorzystanych jako uboczny produkt spalania węgla kamiennego, zastępując nimi część piasku. Jako dodatek przewodzący wykorzystano grafitowy pył powstający w czasie szlifowania elektrod przeznaczonych dla przemysłu metalurgicznego w ilości 35% wag. w stosunku do cementu. Dodatek grafitu w ilości przekraczającej próg perkolacji spowodował zmianę charakteru przewodnictwa elektrycznego z bardzo słabego jonowego na elektronowy, czego konsekwencją jest obniżenie oporu właściwego o kilka rzędów wielkości. Oprócz znacznego zwiększenia przewodnictwa elektrycznego w zaprawach tych zaobserwowano efekt generacji napięcia termoelektrycznego (efekt Seebecka). Napięcie termoelektryczne generowane poprzez zaprawy z dodatkiem grafitu mierzono w zakresie temperatur od -10 do 50°C względem temperatury odniesienia 20°C . Wpływ zawartości mikrosfer na wartość współczynnika Seebecka jest pomijalnie mały. Przeprowadzono badania dynamicznych odpowiedzi zapraw na wymuszone bodźce zewnętrzne - różnice temperatur (pomiar napięcia termoelektrycznego) oraz cykliczne obciążanie ze stosunkowo dużym przyrostem siły (pomiar rezystancji zapraw). W przypadku dynamicznych pomiarów termoelektrycznych realizowanych metodą tzw. skoku temperaturowego zaobserwowano wpływ współczynnika przewodzenia ciepła zapraw na szybkość ustalania się napięcia Seebecka proporcjonalnego do wymuszonej różnicy temperatur. Zaprawy o zmniejszonym współczynniku przewodzenia ciepła znacznie szybciej reagowały na zmiany temperatury zewnętrznej. W przypadku badań zmian oporu elektrycznego w funkcji cyklicznego obciążania zapraw względna zmiana oporu była największa dla zapraw z dużą zawartością mikrosfer glinokrzemianowych.

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 małej gęstości objętościowej uzyskanej przez wprowadzenie mikrosfer glinokrzemianowych uzyskuje się wzrost czułości zapraw cementowych z dodatkiem grafitu na zmienne bodźce zewnętrzne oddziałujące na materiał.

Słowa kluczowe: kompozyty cementowe, zaprawy izolacyjne, grafit, efekt Seebecka, materiały wielofunkcyjne

DYNAMIC ELECTRICAL PROPERTIES OF LIGHTWEIGHT CEMENT MORTARS WITH WASTE GRAPHITE ADDITIVE

This paper presents the results of investigation dynamic electrical and thermoelectric properties of lightweight cement mortars with cenospheres from coal ash and waste graphite powder additive. Quartz sand was replaced by aluminosilicate cenospheres up to 60% of mass. The replacement sand led to significant reduction of bulk density and thermal conductivity of cement mortars. The waste graphite powder obtained during metallurgical electrodes production was used as the conductive filler. Graphite powder was added up to 35% of cement mass. The main physical properties: bulk density and thermal conductivity were investigated. Addition of graphite powder above percolation threshold changed the character of electrical conductivity of cement mortars. Reduction of resistivity is very strong. In case of mortars with 35% cement replacement by graphite powder the Seebeck voltage was measured. Addition of graphite powder to mortars led to moderate deterioration of main properties but cement mortars got possibility of reaction due to the temperature changes. The Seebeck coefficients calculated for all investigated mortars were similar (in error range) and weak dependence of temperature gradient was in each case. But in typical application the thickness of used mortars were very small (about 1-2 cm) and the changes were too small to induce measurable level of thermoelectric force. The point is that in case of lightweight mortars the low thermal conductivity caused much higher temperature gradient and consequence the Seebeck voltage increased. The dynamic measurements of electrical conductivity and Seebeck effect were done. The electrical resistivity of mortars during cyclic load were changed up to 28% for mortars with maximal amount of aluminosilicate cenospheres. The changes were reversible.

In case of Seebeck voltage the effect of time constants of reaction on the immediately temperature change were measured. The effect of thermal conductivity was visible. Lightweight cement mortars with conductive particles as graphite powder are multifunctional materials and may be used to monitor the temperature of building's wall.

Keywords: cement composites, lightweight mortars, graphite, Seebeck effect, smart materials

WPROWADZENIE

Kompozyty mineralne, jakim są zaprawy cementowe, posiadają szereg cech, dzięki którym spełniają podstawowe swoje zadania w obiekcie budowlanym. Zależnie od miejsca zastosowania stawiane są przed nimi wymagania odnośnie do wysokiej wytrzymałości, niskiego współczynnika przewodzenia ciepła czy dużej przyczepności do podłoża. W większości przypadków od tego rodzaju materiałów wymagać się będzie spełnienia wielu kryteriów jednocześnie, a jedną z metod osiągnięcia założonych parametrów jest modyfikacja ich właściwości poprzez wprowadzenie dodatków i domieszek chemicznych. Dodatki przewodzące prąd elektryczny w zasadniczy sposób zmieniają właściwości elektryczne zapraw, a poza znacznym zwiększeniem przewodnictwa elektrycznego mogą dodatkowo nadawać zaprawom nowe cechy, jak np. zdolność generacji napięcia termoelektrycznego, czyniąc z nich kompozyt wielofunkcyjny. Materiały z dodatkami przewodzącymi coraz częściej projektowane są pod kątem zastosowań w budownictwie. Ze względu na swoje unikalne właściwości mogą stanowić grupę materiałów spełniających nowe zadania. Przykładem mogą być nawierzchnie betonowe z możliwością odładzania poprzez przepływ prądu o niskim napięciu, cementowe ekrany pola elektromagnetycznego lub systemy ważenia pojazdów w ruchu poprzez betonową nawierzchnię z dodatkiem włókien węglowych [1-3].

Jednocześnie rozwija się tendencja wykorzystywania wszelkiego rodzaju odpadów przemysłowych jako dodatku do zapraw i betonów. Działanie takie z jednej strony przyczynia się do poprawy stanu środowiska naturalnego, a z drugiej daje szansę stosowania połączenia bardzo różnych materiałów, czasami uzyskując nowe cechy użytkowe modyfikowanych materiałów. Mimo powszechnej dostępności grafitu odpadowego zastosowanie go jako dodatku do zapraw i betonów napotyka bardzo duże trudności i dodatek ten może być stosowany w bardzo ograniczonym zakresie. Z uwagi na cechy grafitu, a w szczególności brak zwilżalności przez wodę oraz pokrój ziaren zastosowanie grafitu jako dodatku do zapraw budowlanych jest problematyczne.

Biorąc jednak pod uwagę to, że dodatek grafitu w zasadniczy sposób zmienia cechy elektryczne takich zapraw, przede wszystkim przewodnictwo elektryczne, oraz pojawia się efekt termoelektryczny, materiały takie można wykorzystać do pomiaru temperatury przegród budowlanych. Kompozyty cementowe z tanim grafitem odpadowym mogą stanowić 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 elektro-

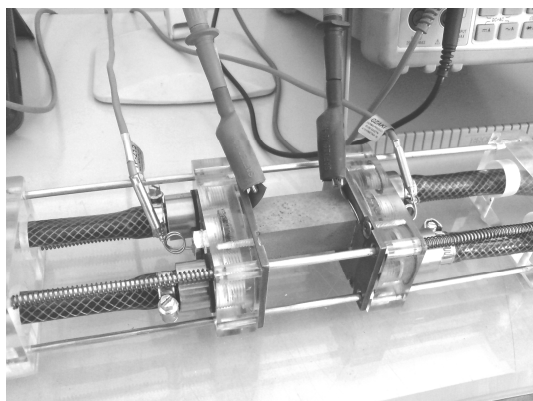
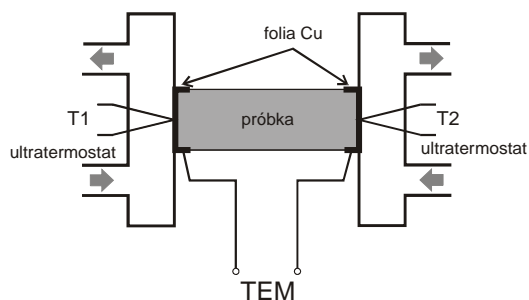
dy grafitowe dla przemysłu metalurgicznego. Odpad w formie pyłu grafitowego generowany jest w procesie szlifowania elektrod przemysłowych. Wprowadzenie grafitu wiąże się również z podwyższeniem przewodnictwa cieplnego zaprawy, co poza specjalnymi zastosowaniami, np. mas wypełniających otwory na czujniki temperatury w betonowych obiektach masywnych, w przeważającej większości przypadków jest niepożądane. Szczególnie niekorzystne jest to w sytuacji, w której w stosunkowo cienkiej warstwie zaprawy (1÷2 cm) konieczne jest uzyskanie na tyle dużego gradientu temperatury, aby niewielka wartość generowanego napięcia Seebecka była w ogóle mierzalna. Rozwiązaniem jest znaczne obniżenie współczynnika przewodzenia ciepła przez zastosowanie dodatkowego lekkiego wypełniacza.

W celu poprawy izolacyjności można wprowadzić 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 pyłu grafitowego uzasadniony jest wybór takiego lekkiego wypełniacza, który dodatkowo w znacznym stopniu nie pogorszy urabialności świeżej mieszanki. Z tego punktu widzenia odpowiednim dodatkiem zmniejszającym przewodnictwo cieplne zapraw są mikrosfery glinokrzemianowe z popiołów lotnych. Mikrosfery mają kulisty kształt, gładką powierzchnię zewnętrzną oraz znikomą porowatość otwartą [12]. 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 monitoringu stanu naprężeń. Istotne jest również określenie właściwości dynamicznych tego rodzaju materiałów pracujących w zmiennych warunkach termicznych i zmieniającym się stanie naprężeń.

MATERIAŁY I METODY BADAŃ

Wykonano serie lekkich zapraw cementowych ze stałą zawartością grafitu, różniących się udziałem mikrosfer glinokrzemianowych zastępujących część piasku. 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 35% wag. w stosunku do cementu. Grafit odpadowy pochodził z procesu szlifowania elektrod przemysłowych w zakładach SGL Carbon S.A. w Nowym Sączu. Wykorzystano frakcję ziarnową poniżej 0,063 μm uzyskaną na drodze separacji sitowej. Do przygotowania zapraw wykorzystano mikrosfery glinokrzemianowe z popiołów lotnych o dominującej frakcji ziarnowej w przedziale 100÷300 μm , średniej gęstości pozornej około 800 kg/m^3

i współczynnika przewodzenia ciepła $0,10 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$. Udział mikrosfer zastępujących część piasku w zaprawach wynosił odpowiednio: 20, 40 i 60% wag. Stosunek wagowy piasku (lub piasku z mikrosferami) do sumy cementu i grafitu wynosił 1:1. Zastosowano piasek kwarcowy o uziarnieniu poniżej $0,5 \text{ mm}$. W celu poprawy właściwości reologicznych do wody dodano plastyfikatora z grupy FM - Remicrete SP60 (Schomburg Retmeier) w ilości 1% wag. do sumy cementu i grafitu. Do sporządzenia wszystkich zapraw wykorzystano cement portlandzki CEM I 42,5R. Badania współczynnika przewodzenia ciepła zapraw wykonano na próbkach w postaci płytek o wymiarach $75\times 75\times 15 \text{ mm}$, natomiast do badania właściwości elektrycznych (pomiar rezystancji) i termoelektrycznych (pomiar współczynnika Seebecka) wykorzystano beleczki o wymiarach $15\times 15\times 75 \text{ mm}$. Próbkę dojrzewały 28 dni w wodzie. Oznaczenie współczynnika przewodzenia ciepła przeprowadzono po wysuszeniu próbek do stałej masy i wyszlifowaniu powierzchni, na której umieszczono głowicę pomiarową. Zastosowano metodę niestacjonarną, tzw. hot-disk, wykorzystując aparat ISOMET 2104 (Applied Precision Inc.) z głowicami pomiarowymi przeznaczonymi dla materiałów o współczynniku przewodzenia ciepła w zakresie $0,3\div 6,0 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$. Pomiar efektu Seebecka przeprowadzono w prototypowym stanowisku pomiarowym (rys. 1), w którym próbkę zaopatrzoną w kontakty elektryczne z folii miedzianej 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.



Rys. 1. Układ pomiarowy stanowiska do badania właściwości termoelektrycznych kompozytów cementowych

Fig. 1. Illustration of the method of thermoelectric measurement of the cement based composites

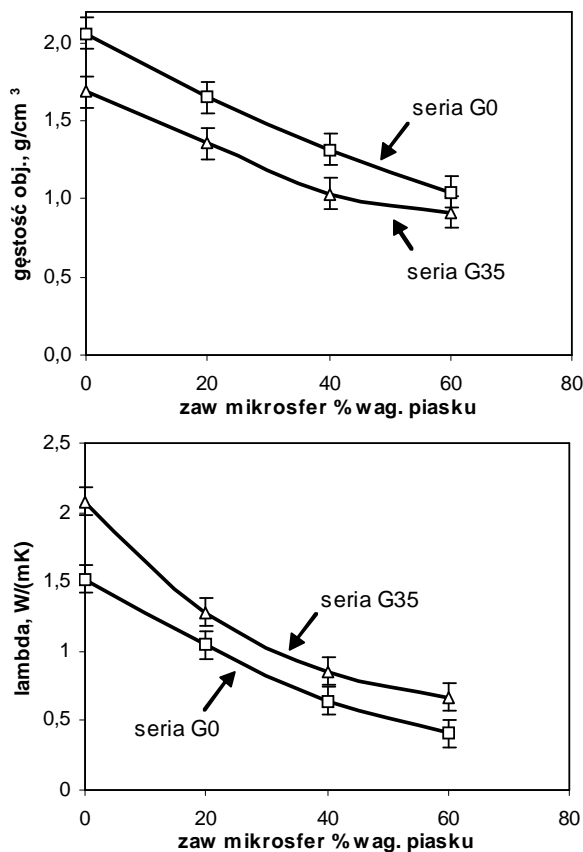
Na obu końcach każdej próbki wykonano kontakty elektryczne z blachy miedzianej o grubości $0,1 \text{ mm}$, dodatkowo wywinęte na długości około 5 mm na boczne płaszczyzny próbki i opasane po obwodzie przewodem miedzianym, który zapewniał stabilne połączenie z przewodami pomiarowymi z multimetrem pomiarowym, analogicznie do metody zaproponowanej w pracy [14]. Pomiar współczynnika Seebecka (względem miedzi) przeprowadzano każdorazowo po ustabilizowaniu się temperatury mierzonej w punkcie styku próbki z płytami pomiarowymi. Różnica temperatur w czasie pomiarów wynosiła odpowiednio -10 i $+30^\circ\text{C}$ względem temperatury odniesienia 20°C . Badania dynamiczne zrealizowano tzw. metodą skoku temperaturowego, która jest typową metodą dla określenia właściwości dynamicznych termopar [15]. Z uwagi na znaczną pojemność cieplną próbki, stosunkowo niski współczynnik przewodzenia ciepła oraz niejednorodność pola temperatur w całej objętości próbki zastosowanie metod analitycznych określenia właściwości dynamicznych nie jest możliwe.

Drugą grupą badań było określenie wpływu cyklicznego obciążania na zmiany rezystancji próbek. Badania przeprowadzono w maszynie wytrzymałościowej w próbie jednoosiowego ściskania. Każdą próbkę obciążano cyklicznie, w następujący sposób: pierwsza faza obciążania z szybkością $20 \text{ mm}/\text{min}$ do poziomu odkształcenia próbki $0,75 \text{ mm}$ (1% wysokości próbki), utrzymanie maksymalnego obciążenia przez 10 s , powrót do poziomu $0,10 \text{ mm}$ (względem odkształcenia początkowego) z szybkością $20 \text{ mm}/\text{min}$ i przetrzymanie przez 10 s . Dla każdej próbki wykonano 5 cykli. Maksymalne odkształcenie odpowiadało w przybliżeniu naprężeniu 4 MPa wywieranemu na próbkę, co stanowi wartość znacznie mniejszą od wytrzymałości na ściskanie badanych zapraw (około 50% wytrzymałości próbek najsłabszych - z 60% mikrosfer zastępujących piasek). Mimo stosunkowo dużej wartości zmiany rezystancji mierzono metodą czteroprzewodową [13].

WYNIKI

Na rysunku 2 przedstawiono zależność między gęstością objętościową oraz współczynnikiem przewodzenia ciepła kompozytów z dodatkiem grafitu (35% wag. w stosunku do cementu) w funkcji zawartości mikrosfer (względem piasku) w zaprawie w stosunku do zapraw bez grafitu. Dodatek grafitu obniża gęstość objętościową zapraw cementowych średnio o około 20%, z wyjątkiem zapraw z 60% zawartością mikrosfer zastępujących piasek, gdzie spadek gęstości objętościowej kompozytu związane jest zasadniczo z dwoma efektami: niższą gęstością grafitu w stosunku do powstałych produktów hydratacji cementu z wodą oraz wprowadzeniem dodatkowych ilości powietrza (głównie na gra-

nicy kontaktowej grafit-zaczyn cementowy) z uwagi na złą zwilżalność grafitu przez wodę.



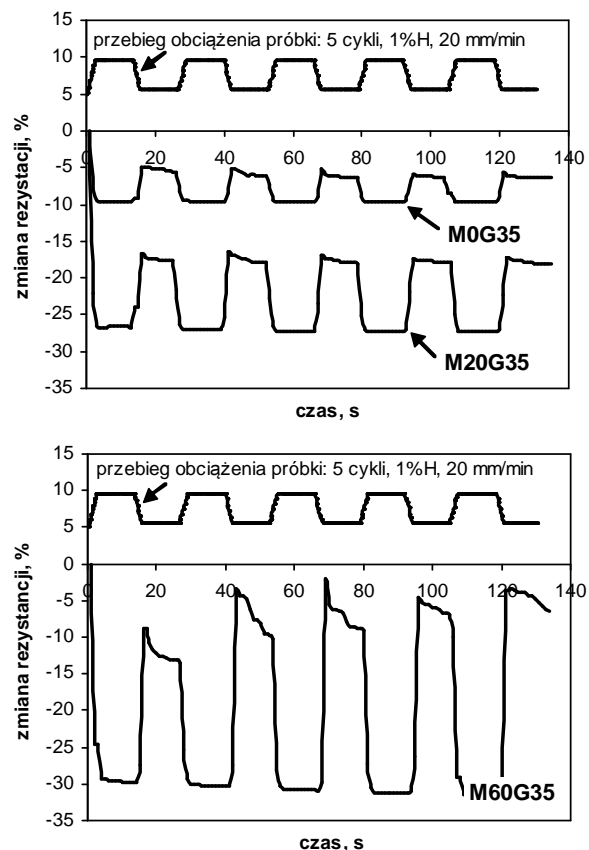
Rys. 2. Wpływ zawartości mikrosfery w piasku na gęstość objętościową i współczynnik przewodzenia ciepła lekkich zapraw z dodatkiem grafitu do cementu w ilości 35% wag.

Fig. 2. Bulk density and thermal conductivity of lightweight mortars with 35 wt. % of graphite vs content of cenospheres

W przypadku badania właściwości izolacyjnych zapraw w funkcji zawartości grafitu i ilości mikrosfery można zaobserwować spadek wartości współczynnika przewodzenia ciepła z poziomu 1,52 W/(m·K) dla próbki bez grafitu i mikrosfery do około 0,41 W/(m·K) dla zaprawy z 60% udziałem mikrosfery zastępujących piasek. Jest to ponad 3-krotna redukcja tego parametru, wskazująca na wysoką efektywność dodatku mikrosfery. Wprowadzenie grafitu w ilości 35% wag. w stosunku do cementu (17,5% wag. w stosunku do sumy suchych składników w kompozycji) podwyższa wartość współczynnika przewodzenia ciepła średnio o około 0,24 W/(m·K), z wyjątkiem zaprawy bez dodatku mikrosfery, dla której zaobserwowano wzrost o 0,56 W/(m·K). Znaczny wzrost przewodnictwa kompozytu związany jest z wysokim przewodnictwem cieplnym grafitu, mimo przeciwdziałającego efektu wprowadzenia dodatkowych ilości powietrza do zaprawy na etapie mieszania zaprawy z uwagi na złą zwilżalność grafitu. Zaprawa o mniejszej gęstości pozornej cechuje się zwiększoną wartością współczynnika przewodzenia ciepła, przy czym wzrost ten sięga 60% dla serii z największą zawartością mikrosfery (60% wag. w stosunku do piasku).

Zaprawy z tak dużym udziałem przewodzącego prądu wypełniacza (powyżej progu perkolacji ziaren grafitu) cechują się znacznie obniżonym przewodnictwem elektrycznym. Opór właściwy zapraw bez dodatku mikrosfery (M0G35) wynosił $1,21 \pm 0,30 \cdot 10^3 \Omega \text{cm}$, natomiast w przypadku zaprawy z maksymalną zawartością mikrosfery (60% wag. w stosunku do piasku) i grafitu jego wartość nie przekraczała poziomu $0,38 \pm 0,12 \cdot 10^3 \Omega \text{cm}$.

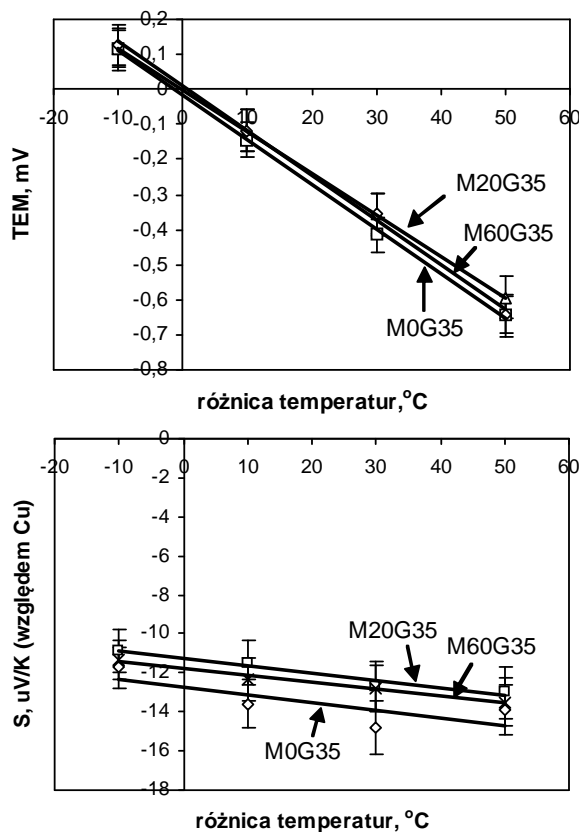
Na rysunku 3 przedstawiono względną zmianę rezystancji próbek poddanych cyklicznemu obciążeniu. Efekt zmiany rezystancji jest proporcjonalny do wymuszonego obciążenia, przy czym w miarę zwiększania zawartości mikrosfery glinokrzemianowych względne zmiany rezystancji zwiększały się. Zaobserwowane zmiany przyjmują dość duże wartości (względnie -9%, -26% i 29% dla próbek odpowiednio M0G35, M20G35 i M60G35), niemniej jednak odpowiadają one zakresowi odkształceń sprężystych próbek, w którym nie następuje jeszcze rozwój spękań krytycznych prowadzących do obniżenia wytrzymałości materiału. Szczególnie, że zgodnie z licznymi pracami, np. [16, 17], zmiany rezystancji zapraw lub betonów poddawanych obciążeniom na poziomie zbliżonym do wytrzymałości końcowej można wykorzystać do diagnozowania rozwoju spękań w kompozycie cementowym. Rejestrowane zmiany rezystancji w badanym zakresie mają charakter odwracalny.



Rys. 3. Względna zmiana rezystancji zapraw z grafitem (35% wag. w stosunku do cementu) w funkcji cyklicznego obciążenia

Fig. 3. Relative changes of mortars resistivity (35 wt. % of graphite rel. to cement) during cyclic load

Dodatek grafitu poza znacznym obniżeniem rezystancji nadaje również zaprawom zdolność generacji napięcia termoelektrycznego (efekt Seebecka). W przypadku badanych zapraw charakter zmian generowanej wartości siły termoelektrycznej jest liniowo proporcjonalny do temperatury. Na rysunku 4 przedstawiono zależność między napięciem termoelektrycznym generowanym przez kompozyt z 35% udziałem grafitu względem cementu a różnicą temperatur działającą na badaną próbkę względem temperatury odniesienia wynoszącej 20°C. Nie zaobserwowano istotnych różnic w wielkości napięcia termoelektrycznego w zależności od udziału mikrosfer w badanych zaprawach.



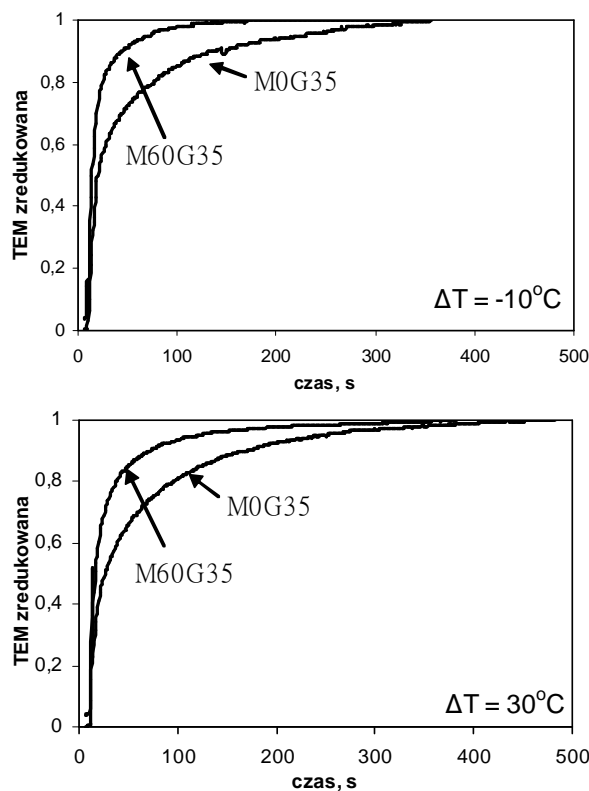
Rys. 4. Zależność napięcia termoelektrycznego względem miedzi w funkcji różnicy temperatur końców próbek z 35% wag. grafitu w stosunku do cementu względem temperatury odniesienia 20°C oraz wyznaczone wartości współczynnika Seebecka

Fig. 4. The Seebeck voltage relative to copper versus temperature difference (relative to 20°C) of mortars with 35 wt. % of graphite and calculated values of Seebeck coefficient vs temperature difference

Na podstawie uzyskanych wyników określono wartość współczynnika Seebecka badanych kompozytów, która wynosiła -12 ± 3 $\mu\text{V/K}$. Jest to stosunkowo mała wartość i w typowych aplikacjach, gdzie grubość zaprawy cementowej nie przekracza 1÷2 cm, możliwy do osiągnięcia gradient temperatury jest bardzo mały. Zapewnienie niskiej wartości współczynnika przewodzenia ciepła zapraw powoduje, że możliwe do osiągnięcia gradienty temperatur na niewielkiej grubości warstwy zaprawy są znacznie większe, dzięki czemu wykorzystanie niewielkiego napięcia Seebecka generowanego

przez zaprawę jest możliwe do wykorzystania w celu monitoringu temperatury przegrody.

Na rysunku 5 przedstawiono odpowiedź badanej próbki na wymuszoną skokową zmianę temperatury jednego końca próbki względem temperatury odniesienia dla dwóch różnic temperatur -10°C i $+30^\circ\text{C}$. 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 obciążone znacznymi błędami. Eksperymentalna wartość stałej czasowej w tym przypadku może posłużyć zasadniczo tylko jako wartość względna określona w celu możliwości porównania szybkości reakcji materiału na skokową zmianę temperatury. Stałą czasową obliczono na podstawie wyznaczonego czasu osiągnięcia wartości połowicznej $\tau_{0,5}$, dzieląc jego wartość przez wartość 0,693.



Rys. 5. Względna zmiana napięcia termoelektrycznego w czasie od powieź na skokową zmianę temperatury końca próbki względem temperatury odniesienia 20°C dla zapraw znacznie różniących się współczynnikiem przewodzenia ciepła

Fig. 5. Relative dynamic thermoelectric behavior of mortars according to thermal conductivity

Należy zwrócić uwagę, że dla konkretnego zastosowania zapraw należy uwzględnić wiele zmiennych i wyznaczona wielkość ma charakter przybliżony. W tabeli 1 przedstawiono wyznaczone wartości stałych czasowych (wartość połowiczną $\tau_{0,5}$, osiągnięcia temperatury zadanej τ_1 oraz stałą czasową elementu τ_s).

TABELA 1. Stałe czasowe zaprawy w badaniu odpowiedzi na skokową zmianę temperatury
TABLE 1. Time constants of mortars during test of temperature changes

Stała czasowa przy różnicy temperatur ΔT	M0G35		M60G35	
	-10°C	+30°C	-10°C	+30°C
$\tau_{0,5}$, s	14	19	9	11
τ_1 , s	347	475	166	377
τ_s , s	20,2	27,4	13,0	15,9

W obu przypadkach szybkość reakcji na zmieniającą się skokowo temperaturę jest zdecydowanie większa dla zapraw o mniejszym współczynniku przewodzenia ciepła. Przy różnicy temperatur -10°C wartość stałej czasowej zaprawy M60G35 stanowi 64% stałej obliczonej dla zaprawy M0G35, a przy wyższym gradiencie temperatur iloraz stałych wynosi 0,58. Również czas stabilizacji wskazań odpowiadający osiągnięciu temperatury założonej był znacznie krótszy w przypadku zapraw o obniżonym współczynniku przewodzenia ciepła poprzez dodatek mikrosfer glinokrzemianowych.

WNIOSKI

Na podstawie przeprowadzonych badań można stwierdzić, że lekkie zaprawy cementowe z mikrosferami glinokrzemianowymi zastępującymi część piasku, w których jako wypełniacz przewodzący zastosowano grafit odpadowy, cechują się pogorszonymi właściwościami użytkowymi w stosunku do zapraw bez grafitu, niemniej jednak zaprawy takie posiadają dobre właściwości elektryczne. Dynamiczne zmiany oporu elektrycznego lekkich zapraw z dodatkiem grafitu w zakresie odkształceń sprężystych są odwracalne i w mierzo- nym 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 niskiemu przewodnictwu cieplnemu uzyskiwany gradient temperatury na cienkiej warstwie zaprawy daje możliwość wykorzystania niewielkiego napięcia termoelektrycznego do monitoringu temperatury. Obniżenie współczynnika przewodnictwa cieplnego dodatkowo powoduje, że szybkość reakcji tego rodzaju materiału na zmiany temperatury jest znacznie 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 niskiej gęstości objętościowej otrzymanej przez wprowadzenie mikrosfer glinokrzemianowych uzyskuje się wzrost czułości zapraw

cementowych z dodatkiem grafitu na zmienne bodźce zewnętrzne oddziałujące na materiał.

Podziękowania

Praca finansowana z funduszy Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego w ramach projektu badawczego nr N506 1597 33.

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* 1995, 25, 1218-1224.
- [3] Guan H., Liu S., Duan Y., Cheng J., Cement based electromagnetic shielding and absorbing building materials, *Cement and Concrete Composites* 2006, 28, 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* 1998, 28, 549-554.
- [5] Wen S., Chung D.D.L., Seebeck effect in carbon fiber-reinforced cement, *Cement and Concrete Research* 1999, 29, 1989-1993.
- [6] Wen S., Chung D.D.L., Seebeck effect in steel fiber reinforced cement, *Cement and Concrete Research* 2000, 30, 661-664.
- [7] Gołek Ł., Pichór W., Modyfikowane zaprawy izolacyjne na bazie perlitu, *Mat. konf. Dni Betonu, 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* 2010, 32, 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* 2003, 33, 723-727.
- [10] Pichór W., Petri M., Właściwości kompozytów cementowo-włóknistych z dodatkiem mikrosfer, *Kompozyty (Composites)* 2004, 4, 319-325.
- [11] Suryavanshi A.K., Swamy R.N., Development of lightweight mixes using ceramic microspheres as fillers, *Cement and Concrete Research* 2002, 32, 1783-1789.
- [12] Matsunaga T., Kim J.K., Hardcastle S., Rohatgi P.K., Crystallinity and selected properties of fly ash particles, *Materials Science and Engineering A* 2002, 325, 333-343.
- [13] Chiarello M., Zinno R., Electrical conductivity of self-monitoring CFRC, *Cement and Concrete Composites* 2005, 27, 463-469.
- [14] Wen S., Chung D.D.L., Effect of fiber content on the thermoelectric behavior of cement, *Journal of Material Science* 2004, 39, 4103-4106.
- [15] Michalski L., Eckersdorf K., *Pomiary temperatury*, WNT, Warszawa 1986.
- [16] Chung D.D.L., Damage in cement-based materials, studied by electrical resistance measurement, *Materials Science and Engineering R*, 2003, 42, 1-40.
- [17] Bontea D., Chung D.D.L., Lee G.C., Damage in carbon fiber-reinforced concrete, monitored by electrical resistance measurement, *Cement and Concrete Research* 2000, 30, 651-659.