

Oparty na cemencie sensor naprężeń: krok w kierunku inteligentnego betonu

Cement Based Strain Sensor: A Step to Smart Concrete

1. Wprowadzenie

W raporcie opublikowanym w USA, stwierdzono że 30% mostów w tym kraju wykazuje uszkodzenia, a infrastrukturalne obiekty betonowe mają znaczny stopień zniszczeń przed osiągnięciem założonego w projekcie czasu eksploatacji (1). Trzęsienia ziemi, degradacja materiału i inne oddziaływania środowiska zmniejszają właściwości konstrukcji. Ocena konstrukcji przez śledzenie jej stanu jest bardzo ważna z punktu widzenia bezpieczeństwa ludzi. Najlepszą decyzję po uszkodzeniu budowli w wyniku trzęsienia ziemi można podjąć w oparciu o badania struktury oraz śledzenie jej stanu. Badania i śledzenie stanu konstrukcji są ważnymi krokami w podejmowaniu decyzji dotyczących utrzymania w dobrym stanie i napraw infrastruktury. Klasyczne sensory (mierniki naprężeń i piezoelektryczne) mają małą trwałość, niską czułość i są drogie. Mała trwałość klasycznych sensorów uniemożliwia pomiary w dłuższym okresie, a ich wysoka cena ogranicza ilość sensorów, które mogą być zastosowane (2). Dodatek włókien węglowych do materiałów opartych na cemencie zmniejsza ich oporność elektryczną. Także poddanie betonu obciążeniom zmniejsza oporność elektryczną (3-5). Czułość (zmiana oporu elektrycznego na jednostkę naprężenia) zbrojonych włóknami węglowymi materiałów opartych na cemencie jest znacznie większa niż klasycznych mierników naprężeń (3). Opracowano układ złożony z dwóch lub czterech elektrod, do pomiaru oporności elektrycznej materiału, który równocześnie poddany jest naprężeniom. W układzie złożonym z dwóch elektrod dwie przewodzące prąd siatki lub płytki metalowe są zanurzone w materiale. Podczas badań mechanicznych przyłożony jest prąd i napięcie mierzy się za pomocą dwóch elektrod. W układzie z czterech elektrod, cztery elektrody są zanurzone w materiale. Przyłożone jest zewnętrzne źródło prądu do dwóch zewnętrznych elektrod, a napięcie jest mierzone za pomocą dwóch zanurzonych w materiale elektrod (6, 7). Wielkość poprzecznego przekroju próbki i odległość pomiędzy elektrodami ma wpływ na pomiary oporności w układzie dwóch elektrod, natomiast nie ma to wpływu w przypadku układu z czterech elektrod. Metoda czterech elektrod jest preferowana, gdyż daje dokładniejsze wyniki (6, 7). Metoda dwóch lub czterech elektrod może być stosowana w dwóch układach: obwodowym i wbudo-

1. Introduction

According to a report published in USA, 30% of the bridges in USA were found to be structurally deficient while concrete infrastructures have a state of material deterioration before the design life is reached (1). Earthquakes, material degradations and other environmental effects decrease the performance of the structures. The assessment of structures by structural health monitoring is very important to protect the lives of people. The best decision about a damaged structure after an earthquake can be made by use of structural tests and structural health monitoring. Structural tests and structural health monitoring are important steps in the decision making of asset management for maintenance and repair of infrastructures. The classical sensors (strain gauges, piezo-electric sensors) have low durability, low sensitivity and high cost. The low durability of classical sensors disables long term measurement while their high cost limits the amount of sensors that can be used (2). The addition of carbon fiber to cement based material decreases the electrical resistance of the material. By application of load, the electrical resistance of the material changes (3-5).

The sensitivity (fractional change in electrical resistance per unit strain) of carbon fiber reinforced cement based material is much higher than the classical strain gauges (3). Two and four electrode configurations have been developed to measure the electrical resistance of the material simultaneously with application of load. In two electrode method, two electrically conductive gauze or plate is inserted into the material. During the mechanical test, current is supplied and voltage is measured from the two electrodes. In four electrode method, four electrodes are inserted into the material. Current is supplied from the outer two and voltage is measured from the inner two electrodes (6, 7). The sample cross section and the distance between the electrodes affect the resistance measurements in two electrode method while they do not have an effect on four electrode method. Four electrode method is preferred as it gives more accurate results (6, 7).

Two and four electrode methods can be applied in two ways; perimetral and embedded configurations. Perimetral electrode configuration in which a conductive tape or paint is applied to the pe-

wanym. Metodę obwodową w układzie czterech elektrod stosowało wielu badaczy, przy czym przewodząca taśma lub warstwa farby były nałożone na powierzchnię próbki (1, 8, 9). W układzie wbudowanych elektrod, płytkę metalową lub siatkę z drutu wprowadza się do wnętrza próbki (10, 11).

Dodatek włókien węglowych do materiału opartego na cemencie zwiększa wytrzymałość na rozciąganie, plastyczność i wytrzymałość na zginanie, a zmniejsza spękania skurczowe. Zwiększanie dodatku włókien węglowych do mieszanki zwiększa przewodność elektryczną aż do granicy, w której przewodność ta przyjmuje wartość stałą. Zawartość włókien węglowych, która nie zwiększa już przewodności elektrycznej nazywana jest granicą perkolacji. Pod obciążeniem ściskającym włókna znajdują się także pod tym obciążeniem i oporność elektryczna maleje. Po zdjęciu obciążenia włókna powracają do ich pierwotnej długości i oporność elektryczna wzrasta. Obciążenie spowoduje uszkodzenie materiału, co pociążeniu za sobą zmianę oporności elektrycznej (12).

Można znaleźć zależność zmiany oporności elektrycznej wywołanej naprężeniem pod obciążeniem (2, 13). Oporność elektryczna zbrojonych włóknami węglowymi materiałów opartych na cemencie wzrasta w trakcie dojrzewania przez 7 dni pod obciążeniem, natomiast maleje po 28 dniach dojrzewania.

Fu i Chung (5) wyjaśnili tę różnicę właściwości po różnym okresie dojrzewania w oparciu o zmianę sztywności matrycy. Potrzebne są badania obejmujące zastosowanie włókien stalowych w sensorach opartych na cemencie, gdyż włókna węglowe są znacznie droższe.

Przewodnictwo prądu elektrycznego w kompozytach cementowych zachodzi w wyniku dwóch mechanizmów. Przewodnictwo jonowe jest odpowiedzialne za przewodzenie prądu przez matrycę kompozytu, natomiast elektronowe przewodnictwo ma miejsce w przypadku stykających się bezpośrednio włókien (6).

W pracy zbadano szereg kompozytów cementowych zbrojonych włóknami stalowymi o różnej długości i różnym ich dodatku. Przeprowadzono pomiary oporności elektrycznej bez i pod naprężeniem ściskającym. Zbadano wpływ długości włókien i ich zawartości w mieszance i naprężeń ściskających na oporność elektryczną kompozytów cementowych. Czynniki wpływające na mierniki oparte na cemencie, a przede wszystkim proporcjonalność pomiarowa i granice naprężeń, które należą do charakterystyki pomiarowej sensorów naprężeń zostały określone.

2. Metody i materiały

Doświadczenia objęły jedenaście mieszanek. Ich składy podano w tablicy 1. Zastosowano włókna stalowe (dostarczone przez Bekaert Izmit Steel Corp. Co) o długości $L = 6$ mm (w mieszankach od 1 do 4 i 11) i 13 mm (w mieszankach 5 do 10) oraz różny ich udział objętościowy. Średnica włókien wynosiła 290 μm . Obrazy pod elektronowym mikroskopem skaningowym powierzchni przeciętych włókien pokazano na rysunku 1. Obserwacje te wykazały, że włókna były pokryte stopem miedzi i mosiądzu, jak to pokaza-

rimeter of the sample in four electrode configuration was applied by different researchers (1, 8, 9). In embedded electrode configuration a metal plate or wire mesh is inserted in the sample (10, 11).

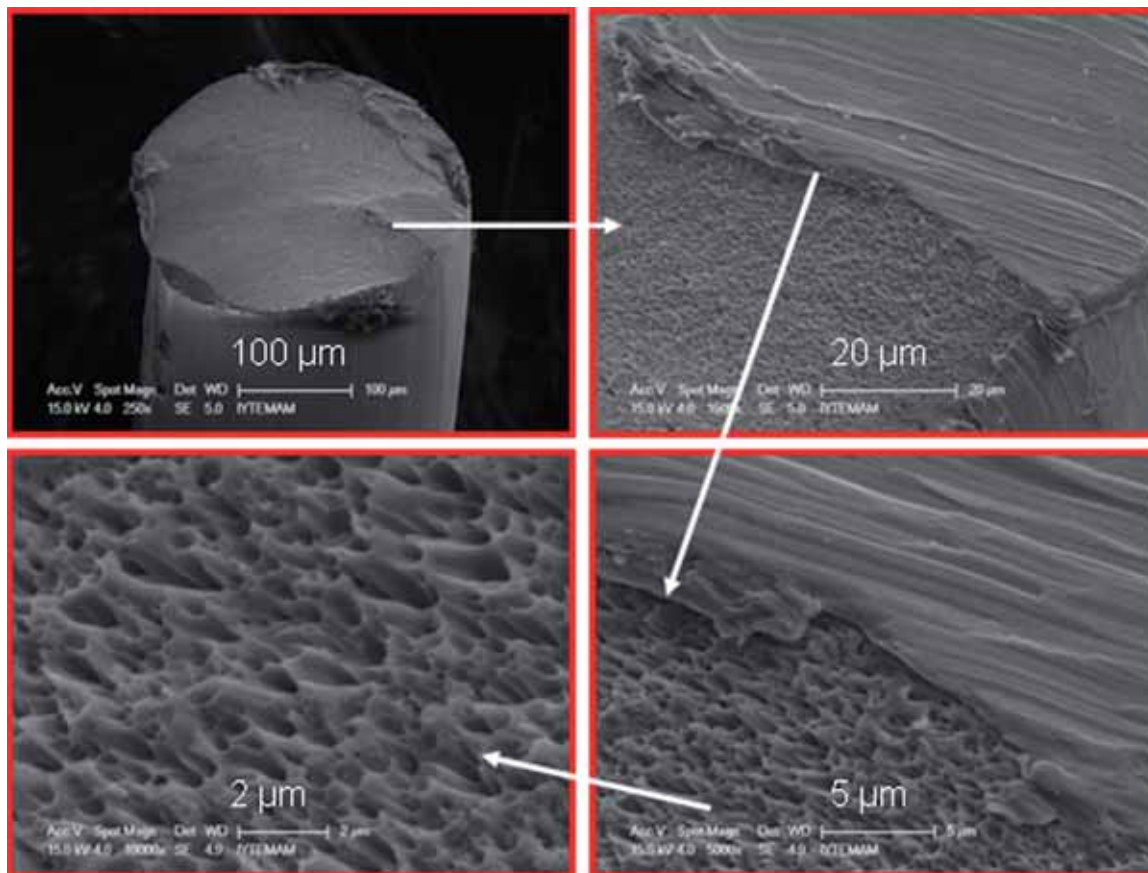
The addition of carbon fiber into the cement based material increases its tensile strength, ductility and flexural capacity and decreases its shrinkage cracking. The increase of the percent of carbon fiber in the mixture increases the electrical conductivity up to a limit at which the electrical conductivity stays constant. The percent of carbon fiber which the electrical conductivity does not increase more is called the percolation threshold. Under compressive load, the fibers are under compression during loading so the electrical resistance decreases. During unloading, the fibers will extend to their original length and electrical resistance will increase. Loading will develop damage in the material which will change the electrical resistance (12). A relation between the electrical resistance change and strain can be developed under load (2, 13). The electrical resistance of carbon fiber reinforced cement based material increases under compression on the 7th day of cure while decreases on the 28th day of cure. Fu and Chung (5) explained the difference in behavior at different ages of cure by the change in stiffness of the matrix. Research is needed for use of steel fibers in developing cement based sensors as carbon fibers are much more expensive with respect to steel fibers.

The conduction of electric current by the cement composite is achieved by two mechanisms. In electrolytic conduction, the electric is conducted by the matrix of the composite while in electronic conduction, the electric is conducted by the direct contact of fibers (6).

In this study, test groups of steel fiber reinforced cement composites with different fiber lengths and amounts were designed. Electrical resistance measurements with and without compressive load were conducted. The effect of fiber length, fiber amount in the mix and compressive strain on the electrical resistance of the cement composite were explored. The correlations between the electrical resistance change and strain were determined. The gage factor, linearity and strain limits which are performance measures for a strain sensor were evaluated for the cement based sensor (CBS).

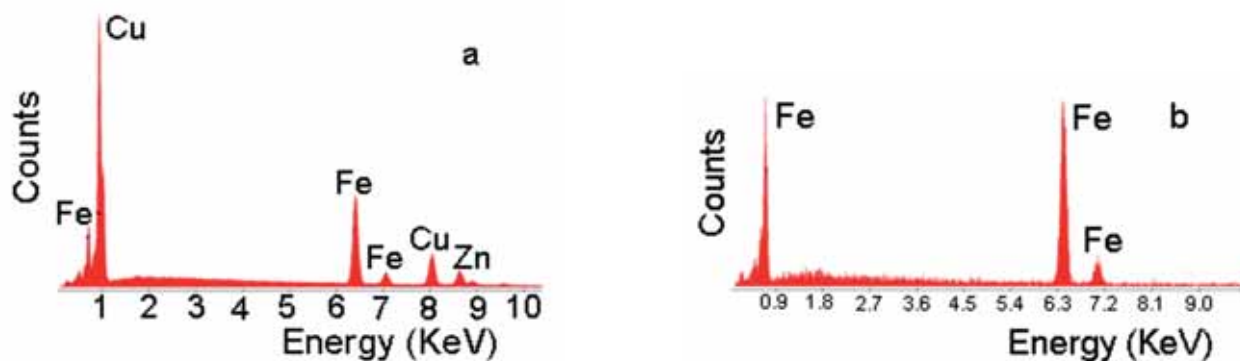
2. Experimental Method and Materials

Eleven different mixes were tested in this study. The mix designs are presented at Table 1. Steel fibers (product of Bekaert Izmit Steel Corp Co.) having lengths of $L = 6$ mm (in mixes 1 to 4 and 11) and $L = 13$ mm (in mixes 5 to 10) were used in different volume percents. The fiber diameter is 290 μm . The scanning electron microscope (SEM) images of the cut surface of the fiber are presented in Fig. 1 with different magnifications. The SEM observations reveal that the fibers were coated. The energy dispersive X-ray analyses (EDX) show that, the fiber was coated with copper alloy, brass, as seen in Fig. 2. Portland cement CEM I 42.5R (14) was used between 661 to 681 kg in 1 m^3 of sample volume for mixes 1 to 10 and 1176 kg in 1 m^3 of sample for mix 11 which does not have



Rys. 1. Przekrój poręczny włókien stalowych pod elektronowym mikroskopem skaningowym

Fig. 1. The SEM images of the metal fiber cross section



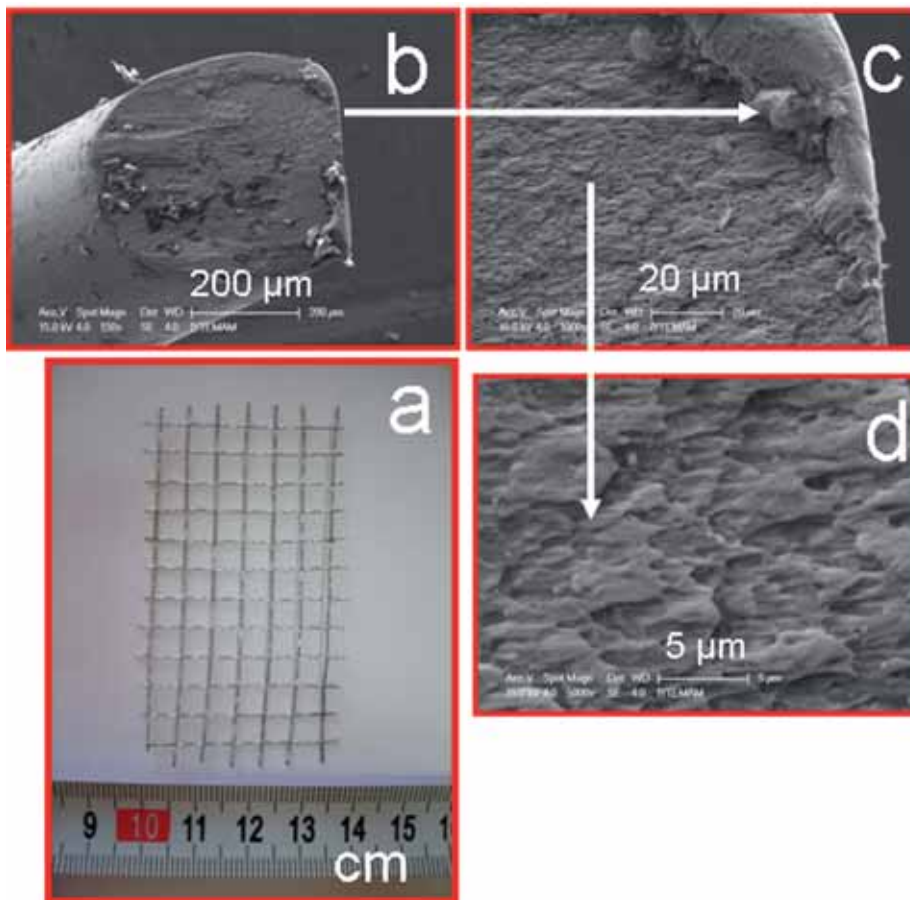
Rys. 2. Mikroanalizy rentgenowskie: a) powierzchni włókna, b) jądra włókna

Fig. 2. The energy dispersive X-ray analyses (EDX) of a) fiber surface b) fiber core

no na rysunku 2. Stosowano także cement portlandzki CEM I 42,5 R (14), przy czym jego dodatek wynosił 661 do 681 kg/m³ w mieszankach od 1 do 10, a 1176 kg/m³ w mieszance 11, bez dodatku piasku. Stosunek piasku do cementu był stały w mieszankach od 1 do 10. Zawartość pyłu krzemionkowego wynosiła 15% we wszystkich mieszankach. Dodatek metylocelulozy wynosił 0,4% mas. cementu. Stosunek w/c wynosił 0,4 z wyjątkiem mieszanki 11, w przypadku której wynosił 0,45. Stosowano bardzo efektywny superplastyfikator. Dodawano Sika ViscoCrete High Tech 30, której bazą był polikarboxylan w ilości 1 do 4% mas. cementu. Jako elektrodę stosowano siatkę stalową pokazaną na rysunku 3a. Średnica drutu wynosiła 380 μm (rysunek 3b). Wymiar oczka

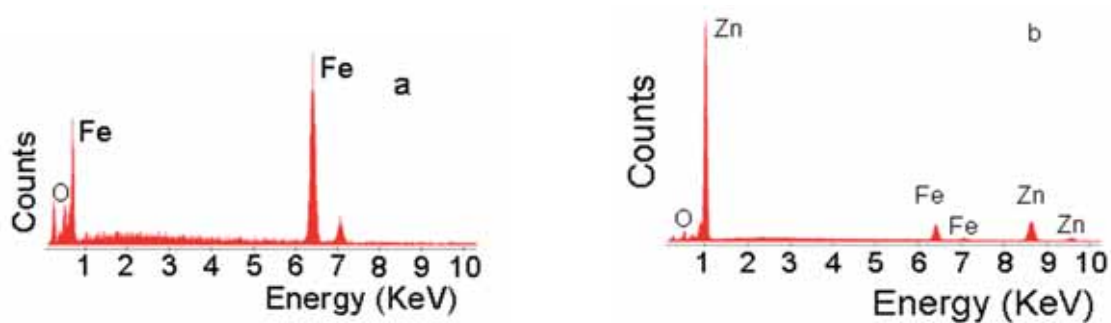
sand. Sand/cement ratio by mass is one for mixes 1 to 10. Silica fume/cement ratio is 15% by mass for all mixes. Methycellulose addition was 0.4% by mass of cement. Water/cement ratio was 0.4 except for mix 11 for which was 0.45. High performance superplasticizer Sika Visco Crete High Tech 30 which has a chemical base of modified polycarboxylate was used in mass percents between 1 to 4 with respect to cement.

Steel wire mesh shown in Fig. 3a was used as electrode. The diameter of the wire is 380 μm (Fig. 3b). The mesh opening is 5 mm. The wire was coated as seen in the SEM images of the cut surface of the wire (Fig. 3c-d). The EDX analyses of the cut



Rys. 3. Siatka metalowa a), przekrój drutu pod mikroskopem elektronowym b), warstwa powierzchniowa i jądro c), jądro drutu siatki d)

Fig. 3. The metal wire mesh a)The mesh b)SEM image of cut surface c)The coating and core d)The core of the metal wire mesh



Rys. 4. Mikroanalizy rentgenowskie drutu siatki metalowej a) jądro, b) powierzchnia

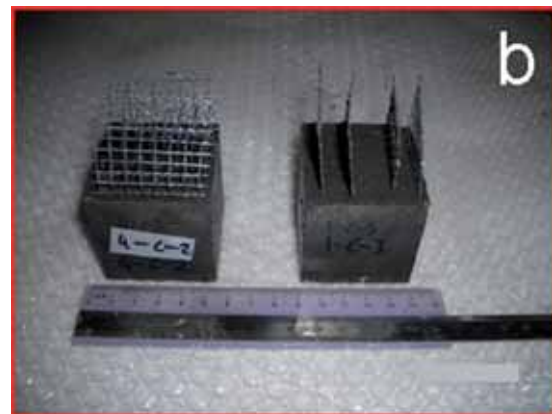
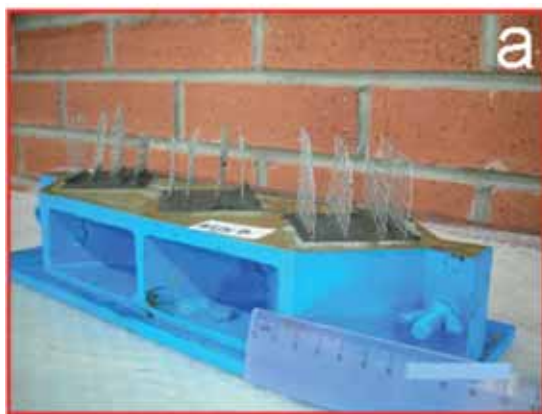
Fig. 4. The energy dispersive X-ray analyses (EDX) of metal mesh a) core b) surface

był 5 mm. Siatka była pokryta cynkiem, jak to wykazały badania przekroju powierzchni drutu (rysunki 3c-3d i 4).

Do przygotowania próbek stosowano formy w kształcie kostek o boku 5 cm (rysunek 5a). Siatkę stalową wprowadzono do formy po jej wypełnieniu kompozytem cementowym. Próbkę zastosowaną w doświadczeniach pokazano na rysunku 5b. Próbkę sensorów wyjmowano z form po 24 godzinach i następnie przechowywano je w wodzie przez 28 dni w temperaturze 25°C. Zaprojektowano 11 różnych mieszanek, przy czym z każdej przygotowano 3 próbki, a więc zbadano w sumie 33 sensory.

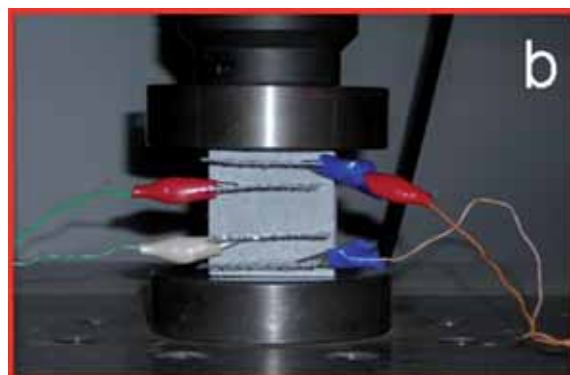
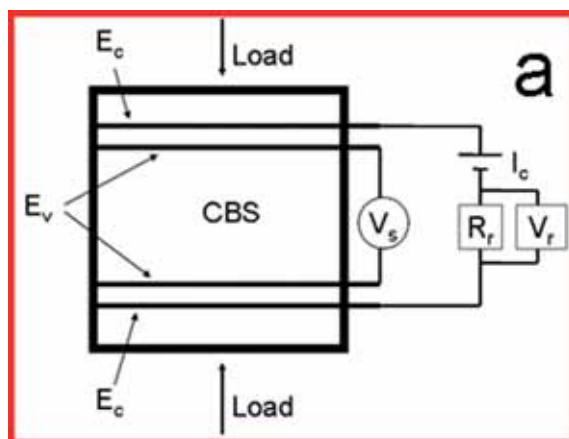
surface of metal mesh show that the core is iron while the coating is zinc (Fig. 4).

5 cm cube shaped moulds were used in sample preparation as shown in Fig. 5a. Metal mesh is inserted in the mould after the cement composite is placed in the mould. Samples used in this study are shown in Fig. 5b. The CBS samples were demoulded 24 hours after mix preparation. The CBS were cured in the water for 28 days at a temperature of 25°C. In this study, 11 different mixes were designed, 3 CBS samples from each mix were prepared; 33 CBS samples were tested.



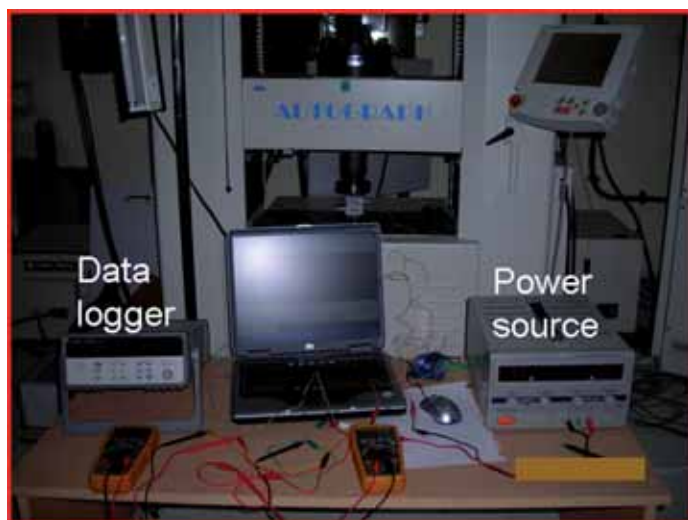
Rys. 5. Forma do kostek a) i sensor oparty na cemencie b)

Fig. 5. The 5 cm cube shaped mold a), CBS samples b)



Rys. 6. Schemat układu pomiarowego a), i próbka na stanowisku pomiarowym b)

Fig. 6. Compression test with electrical resistance measurement a) schema of the test b) CBS sample at the test



Rys. 7. Stanowisko do pomiaru oporności elektrycznej

Fig. 7. The test setup for electrical resistance measurement

Przeprowadzono pomiary oporności elektrycznej przy równoczesnym obciążeniu osiowym, jak to pokazano na rysunku 6a. Obciążenie w trakcie ściskania regulowane przemieszczeniem tłoka wynosiło 0,5 mm/min. Prąd doprowadzano za pośrednictwem

The electrical resistance measurement were conducted simultaneously with uniaxial compression test as seen in Fig. 6a. The loading rate was 0.5 mm/min during the compression test. Direct current was given using the outer two electrodes (E_c) and voltage of CBS was (V_s) measured with the inner two electrodes (E_v) of the CBS (Fig.6b). In order to determine the current on the circuit, (I_c), a reference resistance R_r which has a known resistance, was used in serial to CBS. The load, the displacement of the bearing block, the voltages of the CBS (V_s) and reference resistance (V_r) were measured with 100 msec time steps during the test. The test set up is presented in Fig. 7. A DC power source was used to power the CBS system; Agilent 34970 data acquisition unit was used to measure the voltages V_s and V_r ; a PC was used to save the data; a digital multimeter was used in serial to the circuit of CBS to measure the current and another digital multimeter was used in parallel to the CBS to monitor its connectivity by measuring its voltage (Fig. 7). A Schimadzu AG I mechanical testing machine which can record the load and the displacement of the bearing block, was used to conduct the compression test.

The current passing from the system, I_c , was calculated using Ohm's law as in equation [1]. The resistance of CBS (R_s) was de-

dwóch zewnętrznych elektrod (E_c), a napięcie mierzono za pomocą dwóch wewnętrznych elektrod (E_v), zanurzonych w próbce (rysunek 6b). W celu pomiaru prądu w obwodzie (I_c) zastosowano opornik R_r o znanym oporze. Obciążenie, przemieszczenie tłoka, napięcie w próbce (V_s) i opór odniesienia (V_r) były mierzone co 100 milisekund podczas badań. Urządzenie pomiarowe pokazano na rysunku 7. Stosowano bezpośrednie zasilanie prądowe układu sensorów na bazie cementu. Stosowano miernik 34970 do pomiaru napięcia V_s i V_r , a komputer do gromadzenia danych oraz cyfrowy komputer zainstalowany szeregowo w obwodzie próbki do pomiaru prądu, a także inny cyfrowy komputer zainstalowany równoległe z próbką w celu śledzenia poprzeczności jej połączenia przez pomiar napięcia (rysunek 7). Stosowano maszynę wytrzymałościową Schimadru AGI, która rejestruje obciążenie i przemieszczenie tłoka prasy.

Prąd w układzie 1c obliczano z prawa Ohma stosując równanie [1]. Oporność sensora obliczano wykorzystując prąd 1c i napięcie V_s z równania [2]. Zmiany procentowe oporności (% R) sensora w trakcie badania obliczano z równania [3]. R_{s0} jest opornością sensora bez obciążenia. Obciążenie obliczeniowe (e) i rzeczywiste (E) oznaczano z równań 4 i 5. Były one prawie takie same.

$$I_c = \frac{V_r}{R_r} \quad [1]$$

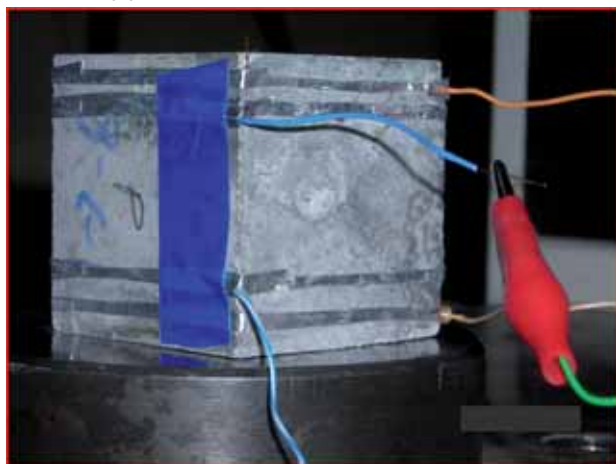
$$R_s = \frac{V_s}{I_c} \quad [2]$$

$$\%R = \left(\frac{R_s}{R_{s0}} - 1 \right) \times 100 \quad [3]$$

$$e = \frac{\Delta L}{L_0} = \frac{L}{L_0} - 1 \quad [4]$$

$$\varepsilon = \ln\left(\frac{L}{L_0}\right) = \ln(1 + e) \quad [5]$$

L jest długością próbki w dowolnym czasie w trakcie badania, L_0 jest długością początkową próbki przed przyłożeniem obciążenia. Obwodowy układ elektrod, w którym cztery przewodzące taśmy aluminiowe były umocowane wokół próbki, zastosowano w przy-



Rys. 8. Układ elektrod obwodowych

Fig. 8. Perimetral electrode configuration

terminated using the current, I_c , and the voltage of the CBS, (V_s), by equation [2]. The percent change in resistance (%R) of the CBS during the test was evaluated using equation [3].

$$I_c = \frac{V_r}{R_r} \quad [1]$$

$$R_s = \frac{V_s}{I_c} \quad [2]$$

$$\%R = \left(\frac{R_s}{R_{s0}} - 1 \right) \times 100 \quad [3]$$

The R_{s0} is the resistance of the CBS without load.

The engineering strain (e) and true strain (ε) were determined using the equations [4 and 5]. The engineering and true strains were almost same.

$$e = \frac{\Delta L}{L_0} = \frac{L}{L_0} - 1 \quad [4]$$

$$\varepsilon = \ln\left(\frac{L}{L_0}\right) = \ln(1 + e) \quad [5]$$

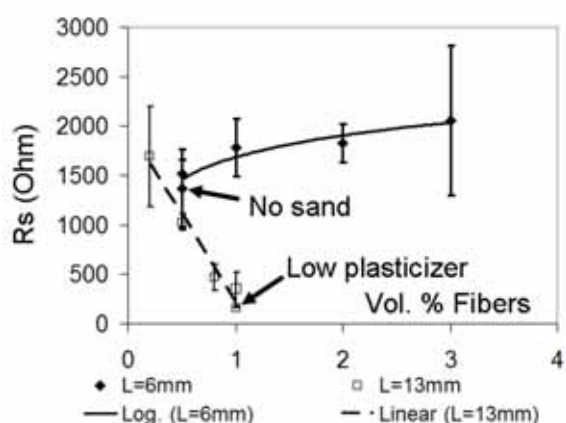
The L is the length of the sample at any time during the test, L_0 is the initial length of the sample before load is applied.

Perimetral electrodes configuration in which four conductive aluminum tape were wrapped around the sample was tested with mix 8 (Fig. 8). The current is given by the outer two electrodes and the voltage of the CBS (V_s) was measured by the inner two electrodes. Perimetral electrode configuration can be used when the fiber % is high and it is not possible to use embedded electrodes.

3. Results and Discussions

The voltage signal recorded using the perimetral electrode configuration was very weak. The perimetral electrode configuration will be tested with copper tape and paint.

The electrical resistance measurements of the CBS samples were conducted without applying compressive load and the electrical resistance (R_s) versus volume % of fibers graph is presented in Fig. 9. Each data point is an average of 3 measurements and error bar is plus-minus one standard deviation. For mixes having fibers of length $L = 6$ mm, as volume % of fibers increases, the amount of fiber-matrix interfaces increase. Every fiber-matrix interface increases the probability of void formation in the composite, thus increases its porosity. Thus, as volume % of $L = 6$ mm fibers increases, the porosity of the composite increases, and electrical resistance (R_s) increases as seen in Fig. 9. In the case of the mixes with $L = 13$ mm fibers, as volume percent increases, the electrical resistance decreases due to the conduction of the current by direct contact of the fibers (electronic conduction) with increasing volume % (Fig. 9). For mixes with 0.5% volume of fibers with length $L = 6$ mm, there are two data points in Fig. 9; one for a mix with sand and the other without sand. The use of sand increases the electrical resistance as seen in Fig. 9. For same volume percent,



Rys. 9. Oporność elektryczna (R_s) w zależności od zawartości włókien (%) bez przyłożonego obciążenia

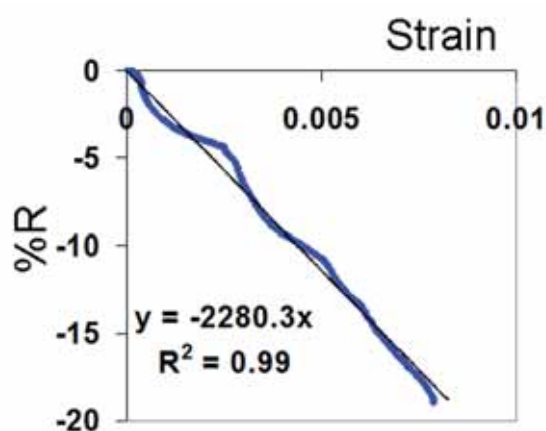
Fig. 9. Electrical resistance (R_s) versus volume % fibers without application of load

padku mieszanki 8 (rysunek 8). Zasilanie prądem odbywało się za pośrednictwem dwóch zewnętrznych elektrod, a pomiar napięcia sensora (V_s) następował za pomocą dwóch elektrod wewnętrznych. Obwodowy układ elektrod można stosować w przypadku gdy zawartość włókien jest duża i można używać zanurzonych w materiale elektrod.

3. Wyniki i ich omówienie

Napięcie zarejestrowane za pomocą elektrody obwodowej było bardzo niskie. Ten układ elektrod będzie sprawdzony przy użyciu taśmy miedzianej i warstwy farby.

Pomiary oporności elektrycznej próbek przeprowadzono bez przyłożenia obciążenia ściskającego i oporność elektryczną w zależności od % objętości włókien pokazano na rysunku 9. Każdy punkt pomiarowy jest średnią z trzech pomiarów i błąd pomiarowy jest w przybliżeniu równy jednej odchyłce standardowej. W przypadku mieszanek z włóknami o długości $L = 6$ mm w miarę wzrostu udziału objętościowego włókien ilość kontaktów włókno-matryca zwiększa się. Każda powierzchnia kontaktu zwiększa prawdopodobieństwo utworzenia pustki w kompozycie i w związku z tym porowatość kompozytu wzrasta. Tak więc wzrost objętości włókien $L = 6$ mm zwiększa porowatość kompozytu, a także oporność elektryczną (R_s) jak to pokazano na rysunku 9. W przypadku mieszanek z włóknami $L = 13$ mm w miarę wzrostu ich udziału objętościowego oporność elektryczna maleje w wyniku przewodności prądu przez stykające się włókna (przewodnictwo elektronowe). W wyniku wzrostu ich udziału (rysunek 9) mieszanka zawierająca 0,5% objętościowego włókien o długości $L = 6$ mm ma dwa punkty na rysunku 9; jeden dla mieszanki z piaskiem i drugi bez piasku. Dodatek piasku zwiększa oporność elektryczną, jak to pokazano na rysunku 9. Przy tym samym udziale objętościowym włókna o długości $L = 13$ mm stykają się ze sobą częściej niż włókna o długości 6 mm. Z tego względu oporność elektryczna mieszanek z włóknami o długości 13 mm jest niższa niż mie-



Rys. 10. % R w zależności od naprężenia w próbce z mieszanki 11 (bez piasku) z włóknami o długości $L = 6$ mm, 0,5% objętościowe; $K = 24$, $LE = 7\%$, $SL = 0,008$

Fig. 10. The %R versus strain for mix 11 (no sand), with fiber length $L = 6$ mm, 0.5 % volume; $K = 24$, $LE = 7\%$, $SL = 0.008$

the fibers with length of $L = 13$ mm are contacting with each other more often than the fibers having length of $L = 6$ mm. The electrical resistance of the mixes with fiber length of $L = 13$ mm is lower than mixes having $L = 6$ mm fibers due to electronic conduction of the electric current in which the fibers conduct the current directly (Fig. 9).

Visual inspection of the samples before compression test revealed that the increase of superplasticizer increased the pores on their surfaces which is an indication of increasing porosity (the mix 6 and mix 7 in Table 1 compared). The increase of porosity results of an increase in electrical resistance as seen in Fig. 9, for the $L = 13$ mm fiber length, 1% volume of fiber.

The performance of a strain gage is evaluated with two main parameters; gage factor (K) and linearity (LE). Gage factor (K) is the fractional change in electrical resistance per unit strain, as in equation [6]. It is a measure of strain sensitivity for strain gages. It is the slope of percent change in resistance (%R) versus strain graph divided by 100. The higher the K , the more sensitive the sensor is. The gage factor of commercial metal strain gages is around 2. Linearity (LE) is the percent of maximum difference between input-output curve (%R versus strain curve) and fitted linear regression line, to full scale output (R_{fs}), as in equation [7]. The error in measurement of strain decreases by decreasing linearity.

$$K = \frac{(R - R_{s0}) / R_{s0}}{\Delta \varepsilon} \quad [6]$$

$$\%E = \left(\frac{\Delta_{\max}}{\%R_{fs}} \right) \times 100 \quad [7]$$

The limit for a strain gage for measuring strain with small error is defined as the strain limit (SL). The strain limit (SL) of typical commercial metal strain gages is between 0.5%-3%.

The percent change of electrical resistance (%R) versus strain graphs were obtained using the real time voltage and stroke me-

szanek z włóknami sześćo milimetroowymi w wyniku przewodnic-
 twa elektronowego prądu bezpośrednio przez włókna (rysunek 9).

Optyczna weryfikacja próbek przed poddaniem obciążeniu ści-
 skającemu wykazała, że zwiększenie dodatku superplastifikatora
 zwiększa występowanie porów na ich powierzchni, co jest wskaź-
 nikiem wzrostu ich porowatości. (mieszanki 6 i 7, porównane w ta-
 blicy 1.). Zwiększenie porowatości powoduje wzrost oporności elek-
 trycznej, co pokazano na rysunku 9 dla próbek z włóknami o dłu-
 gości L=13 mm, przy ich udziale 1% objętościowych.

Charakterystykę sensora naprężeń oparto na ocenie dwóch para-
 metrów: stałej sensora (K) i proporcjonalności pomiarowej. Stała
 sensora (K) jest zmianą oporności elektrycznej na jednostkę naprę-
 żenia, wyrażoną w formie zależności [6]. Jest to miara czułości
 sensora na zmiany naprężeń i można ją wyrazić jako nachylenie
 prostej odpowiadającej zmianie procentowej oporności (%R)
 w zależności od naprężenia, podzielonego przez 100. Im większe
 jest K tym czulszy jest sensor. Stała sensora w przypadku han-
 dlowych, metalowych czujników naprężeń wynosi 2. Proporcjonal-
 ność pomiarowa (LE) jest maksymalną różnicą pomiędzy krzywą
 wejście-wyjście (% R w stosunku do krzywej naprężenia) i wyzna-
 czonej prostej regresji do całkowitego zakresu wyjścia (R_{fs}) jak w
 równaniu [7]. Błąd pomiaru naprężenia maleje ze spadkiem pro-
 porcjonalności.

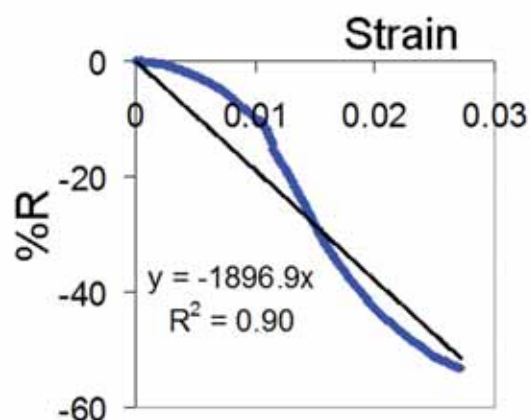
$$K = \frac{(R - R_{s0}) / R_{s0}}{\Delta \varepsilon} \quad [6]$$

$$\%E = \left(\frac{\Delta_{max}}{\%R_{fs}} \right) \times 100 \quad [7]$$

Graniczny pomiar naprężenia z małym błędem za pomocą senso-
 ra jest określony jako naprężenie graniczne (SL). Naprężenie gra-
 niczne (SL) typowych handlowych sensorów do pomiaru naprę-
 żeń wynosi od 0,5 do 3%.

Zmiany procentowe oporności elektrycznej w procentach (%R)
 w funkcji krzywej naprężenia otrzymano wykorzystując pomiary
 rzeczywistego napięcia w czasie i zniszczenia próbki w trak-
 cie obciążenia ściskającego. Zmiany procentowe oporności elek-
 trycznej (%R) w funkcji krzywej naprężeń w przypadku miesz-
 anki 11 bez piasku z włóknami o długości L= 6mm i ich udziale rów-
 nym 0,5% objętościowych pokazano na rysunku 10. Stała senso-
 ra K = 24 co jest 12 razy większe od przemysłowych czujników.
 Proporcjonalność pomiarowa wynosi 7% całej skali wejścia, a więc
 jest niska. Graniczne naprężenie wynosi 0,8% co leży w zakresie
 handlowych metalowych sensorów. Współczynnik korelacji lini-
 owej regresji jest 0,99.

Stała sensora mieszanki 2, w której zastosowano włókna o dłu-
 gości 6 mm i ich udział 1% objętościowy jest 20 (rysunek 11). Tak
 więc mieszanka 2 ma 10 razy większą czułość w porównaniu do
 metalowych czujników handlowych. Proporcjonalność pomiarowa
 wynosi 18%, a granica naprężenia jest 2,7% co odpowiada górnej
 granicy handlowych czujników metalowych. Współczynnik korela-
 cji liniowej prostej regresji wynosi 0,9.

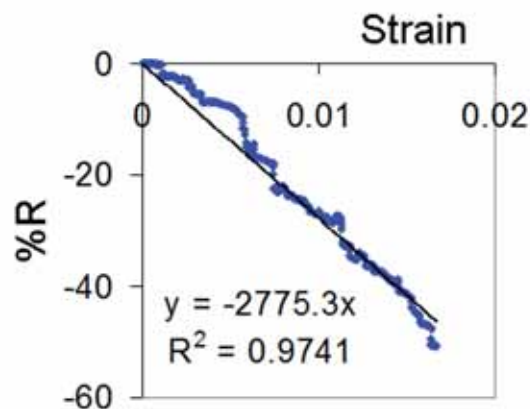


Rys. 11. % R w zależności od naprężenia w próbce z mieszanki 2, włókna
 o długości L = 6 mm, udział 1% objętościowy, K = 20, LE = 8%, SL = 0,027

Fig. 11. The %R versus strain for mix 2, fiber length is L = 6 mm with 1%
 volume; K = 20, LE = 18%, SL = 0.027

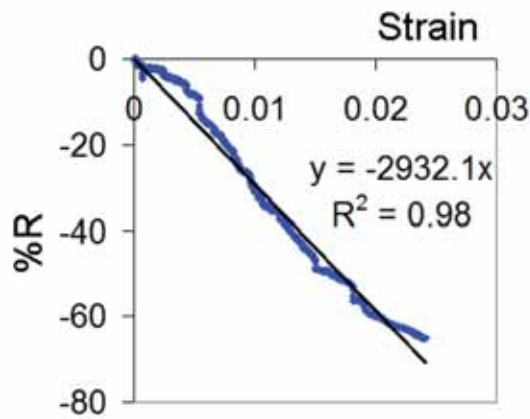
asurements during the compression tests. The percent change of
 electrical resistance (%R) versus strain graph for mix 11, which
 has L = 6 mm fibers with 0.5% volume fraction and which does
 not have sand is presented in Fig. 10. The gage factor is K = 24
 which is 12 times the gage factor of commercial metal strain gages.
 Thus, it is 12 times more sensitive to strain with respect to com-
 mercial metal strain gages. The linearity is 7% in full scale output,
 which means the use of linear regression equation for estimation
 of strain will give a maximum error of 7%, which is low. The stra-
 in limit is 0.8%, which is in the range of commercial metal strain
 gages. The correlation coefficient of linear regression line is 0.99.

The gage factor of mix 2 which has L = 6 mm fibers with 1% vo-
 lume fraction is 20 (Fig. 11). Thus, mix 2 is 10 times more sensi-
 tive with respect to commercial metal strain gages. The linearity
 is 18% and strain limit is 2.7% which is on the upper limit of stra-
 in limit of commercial metal strain gages. It has a correlation co-
 efficient of 0.9 for linear regression line.



Rys. 12. % R w zależności od naprężenia w próbce z mieszanki 3, włókna
 o długości 6 mm, udział 2%; K = 30, LE = 13%, SL = 0,018

Fig. 12. The %R versus strain for mix 3, fiber length is L = 6 mm with 2%
 volume fraction; K = 30, LE = 13%, SL = 0.018

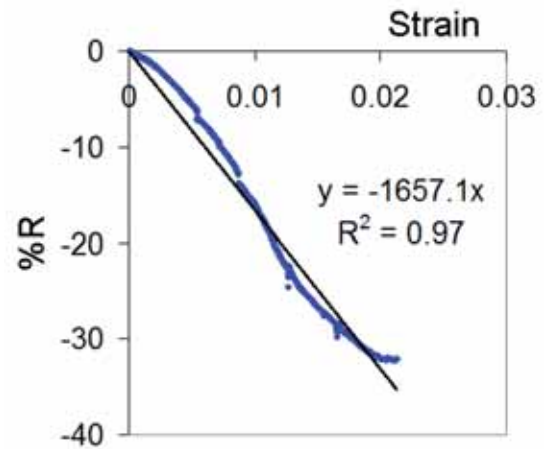


Rys. 13. Zależność % R od naprężenia, próbka z mieszanki 4, długość włókien L = 6 mm, udział 3% objętościowe; K = 27, LE = 10%, SL = 0,024

Fig. 13. The %R versus strain for mix 4, fiber length is L = 6 mm with 3% volume fraction; K = 27, LE = 10%, SL = 0.024

Mieszanka 3 ma stałą sensora K = 30 co jest 15 razy większe od handlowych czujników metalowych (rysunek 12). Proporcjonalność pomiarowa wynosi 13%, a granica naprężenia 1,8% co odpowiada średniej granicy handlowych czujników metalowych. Współczynnik korelacji liniowej prostej regresji wynosi 0,97, jest więc wysoki.

Mieszanka 4 z włóknami o L = 6 mm, których udział wynosił 3% objętościowe ma stałą K = 27 i ma trzynastokrotnie większą czułość od handlowych czujników metalowych, co pokazano na rysunku 13. Ma ona proporcjonalność pomiarową 10% i granicę naprężenia 2,4%, co odpowiada górnej granicy handlowych czujników metalowych. Prosta regresji dla % R w zależności od naprężenia ma współczynnik korelacji 0,98.

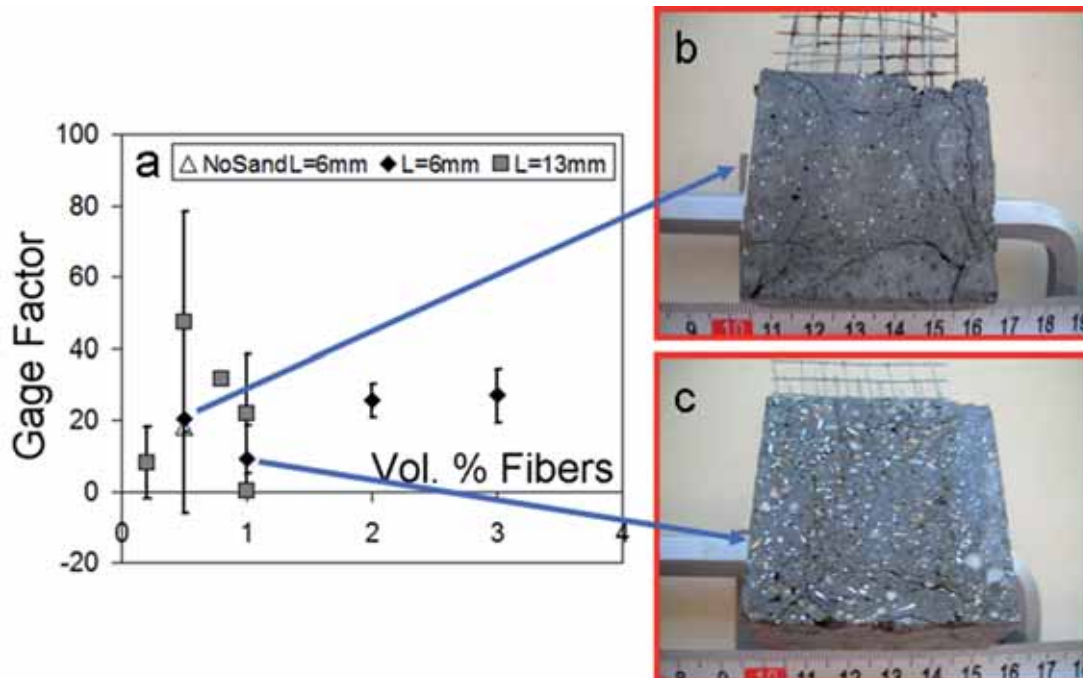


Rys. 14. % R w zależności od naprężenia w próbce z mieszanki 9, długość włókien L = 13 mm, udział 0,2% objętościowe, K = 15, LE = 11%, SL = 0,021

Fig. 14. The %R versus strain for mix 9, fiber length is L = 13 mm with 0.2% volume fraction; K = 15, LE=11%, SL = 0.021

Mix 3 has gage factor K = 30, which is 15 times more sensitive with respect to commercial metal strain gages (Fig. 12). Its linearity is 13%, and it has a strain limit of 1.8% which is average strain limit of commercial metal strain gages. The correlation coefficient of linear regression line is 0.97 which is high.

The mix 4 which has L = 6 mm fibers with 3% volume fraction, has a gage factor of K = 27 and it is thirteen times more sensitive than commercial metal strain gages as seen in Fig. 13. It has a linearity of 10% and strain limit of 2.4% which is on the upper bound of strain limit of commercial metal strain gages. The linear regression line for %R versus strain has a correlation coefficient of 0.98.



Rys. 15. a) Stała sensora w zależności od udziału objętościowego włókien, b) przekrój poprzeczny próbki z mieszanki 1, c) przekrój poprzeczny próbki z mieszanki 2

Fig. 15. a) The gage factor versus volume percent of fibers, b) The cross section view of a mix 1 sample, c) The cross section view of a mix 2 sample

% R w zależności od krzywej naprężenia próbki z mieszanki 9, do której dodano włókna o długości 13 mm, a ich udział objętościowy wynosił 0,2%, ma stałą sensora $K = 15$ (rysunek 14). Próbka z mieszanki 9 ma 7 razy większą czułość niż handlowe czujniki metalowe, a proporcjonalność pomiarowa $LE = 11\%$ i granica naprężenia 2,1%. Współczynnik korelacji liniowej prostej regresji wynosi 0,97.

Oporność elektryczna maleje ze wzrostem naprężenia ściskającego jak to pokazano na rysunkach 10-14. Jest szereg mechanizmów, które powodują spadek oporności elektrycznej pod obciążeniem ściskającym. Są one następujące: włókna ulegają sprężaniu co powoduje ich wciskanie w matrycę, spękania ulegają zamknięciu co zwiększa przewodność matrycy, zespołu włókna-matryca i pomiędzy samymi włóknami.

Zależność stałej sensora od udziału objętościowego włókien pokazano na rysunku 15a, na którym każdy punkt jest średnią z 3 pomiarów, a błąd pomiarowy odpowiada mniej więcej odchyłce standardowej. Przekroje poprzeczne próbek z mieszank 1 i 2 pokazano odpowiednio na rysunkach 15 b-c, po obciążeniu ściskającym. W przypadku mieszank 1 i 2 z włóknami $L = 6$ mm w miarę wzrostu ich zawartości objętościowej od 0,5 do 1%, włókna zaczynają się stykać i zachodzi przewodność elektronowa prądu w związku z czym wpływ naprężenia na oporność maleje i stała sensora ulega zmniejszeniu co widać na rysunku 15a.

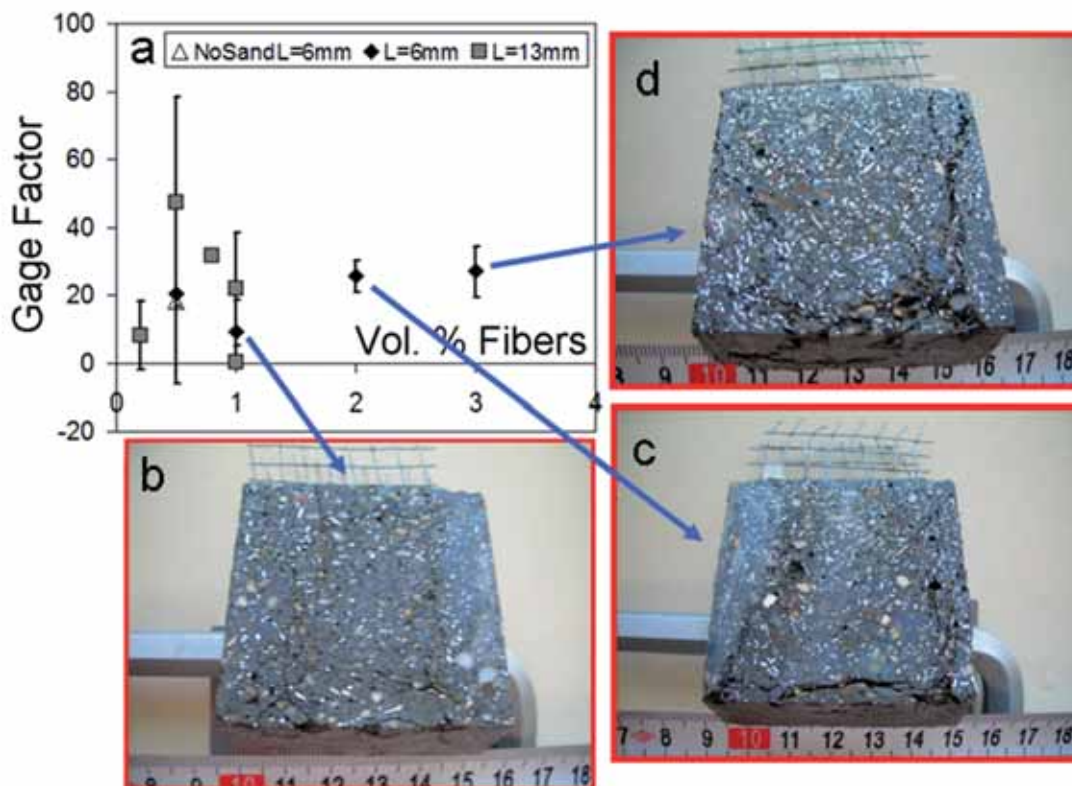
W przypadku próbek z mieszank 2-4 (przekroje poprzeczne na rysunkach 16 b-d po obciążeniu ściskającym) z włóknami o dłu-

The %R versus strain graph of mix 9 which has $L = 13$ mm fiber length with 0.2% volume fraction has a gage factor of $K = 15$ (Fig. 14). Mix 9 is 7 times more sensitive than commercial metal strain gages while having a linearity of $LE = 11\%$ and strain limit of 2.1%. The correlation coefficient of linear regression line is 0.97.

The electrical resistance decreases under compressive strain as seen in Figs. 10-14. There are several mechanisms which cause decrease in electrical resistance under compression. These are; the fibers are compressed which results in fiber push-in; the crack closure leading to increase in matrix-matrix, fiber-matrix and fiber-fiber conductivity.

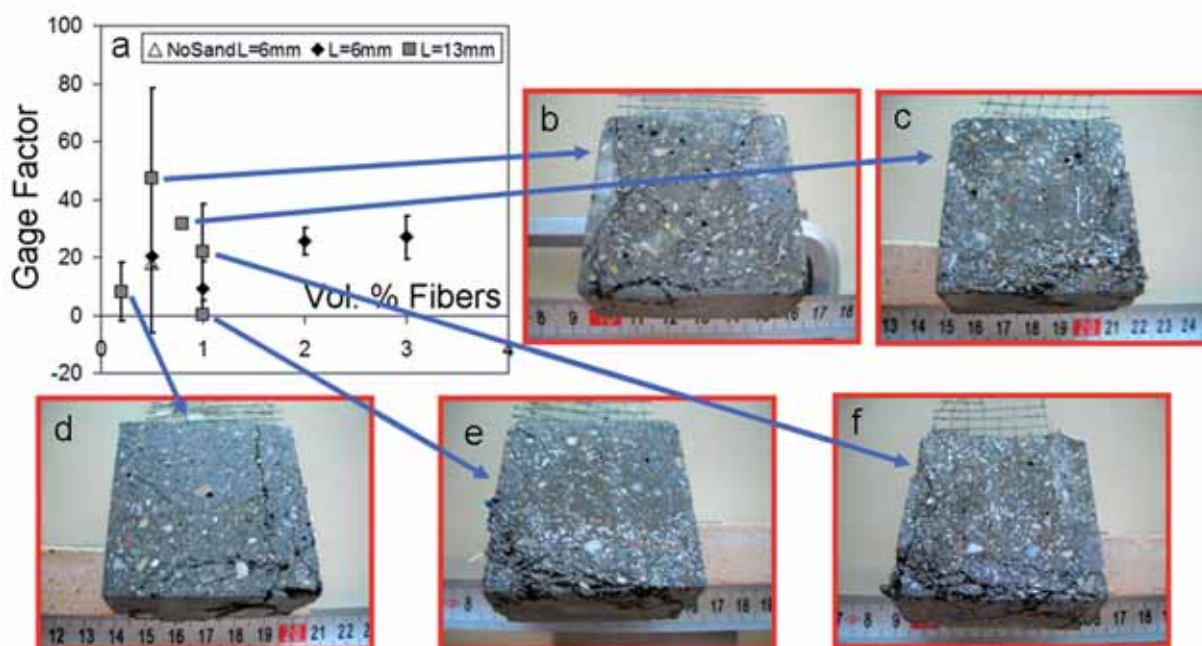
Gage factor versus volume % of fibers is presented in Fig. 15a in which each data point is an average of 3 data and the error bar is plus-minus one standard deviation. The cross section views of mix 1 and mix 2 samples are presented in Fig. 15 b-c after compression test, respectively. For mixes 1 and 2, with $L = 6$ mm fiber length, as volume % increases from 0.5 to 1, the fibers start touching each other, and electric current is conducted by direct contact of fibers (electronic conduction) so the effect of strain on resistance change decreases, the gage factor decreases as seen in Fig. 15a.

For the samples from mixes 2-4 (cross sections in Fig. 16 b-c-d after compression test, respectively) with $L = 6$ mm fibers, as volume % increases from 1 to 3, the composite became softer due to voids in fiber-matrix interface and more deformed. Under load, as it deforms more, the fibers deform more and touch each other



Rys. 16. a) Stała sensora w zależności od udziału objętościowego włókien, b) poprzeczny przekrój próbki z mieszanki 2, c) przekrój poprzeczny próbki z mieszanki 3, to samo z mieszanki 4

Fig. 16. a) The gage factor versus volume percent of fibers, b) The cross section view of a mix 2 sample, c) The cross section view of a mix 3 sample, d) The cross section view of a mix 4 sample



Rys. 17. a) Stała sensora w zależności od udziału objętościowego włókien. Przekroje poprzeczne próbek: b) mieszanka 5, c) mieszanka 10, d) mieszanka 9, e) mieszanka 7, f) mieszanka 6

Fig. 17. a) The gage factor versus volume percent of fibers. The cross section views of samples: b) mix 5, c) mix 10, d) mix 9, e) mix 7, f) mix 6

gości 6 mm, w miarę wzrostu ich udziału objętościowego od 1 do 3%, kompozyt staje się bardziej podatny mechanicznie, w związku z powstawaniem pustek na powierzchni kontaktów włókien z matrycą i odkształca się więcej. Pod obciążeniem, ponieważ odkształca się bardziej, włókna także ulegają większemu odkształceniu i tworzą więcej kontaktów między sobą co powoduje większy procentowy wzrost oporności, a stała sensora wzrasta jak to pokazano na rysunku 16a.

Przekroje poprzeczne próbek z mieszanek zawierających włókna o długości $L = 13$ mm pokazano na rysunkach 17 b-f. W przypadku mieszanek 5 i 9 z tymi włóknami gdy ich zawartość rośnie z 0,2 do 0,5% sztywność próbek ulega zmniejszeniu w związku z dużą ilością pustek wokół włókien. W wyniku spadku sztywności i większej zawartości włókien w przypadku deformacji zwiększa się liczba kontaktów pomiędzy nimi oraz ulegają one większej deformacji w związku z czym stała czujnika wzrasta jak to pokazano na rysunku 17a.

W przypadku próbek z mieszanek zawierających włókna o $L = 13$ mm w miarę jak wzrasta ich udział z 0,5 do 1% objętościowego przekracza on granicę perkolacji i włókna tworzą zamkniętą więźbę przewodzącą bezpośrednio prąd elektryczny. Odkształcenia zmieniają oporność w mniejszym stopniu w funkcji wzrostu udziału włókien i stała sensora maleje jak widać na rysunku 17a.

Wzrost udziału objętościowego włókien nie wpływa na proporcjonalność pomiarową w przypadku próbek z mieszanek z włóknami $L = 6$ mm (rysunek 18). Proporcjonalność ta jest wyższa w przypadku próbek z piaskiem. Włókna ulegają aglomeracji i ich rozmieszczenie staje się nieregularne w przypadku mieszanek zawierających włókna o długości 13 mm, gdy ich zawartość jest większa. Nieregularne rozmieszczenie włókien powoduje przeskoki napię-

more, the variation in the % change in resistance increases, gage factor increases as in Fig. 16a.

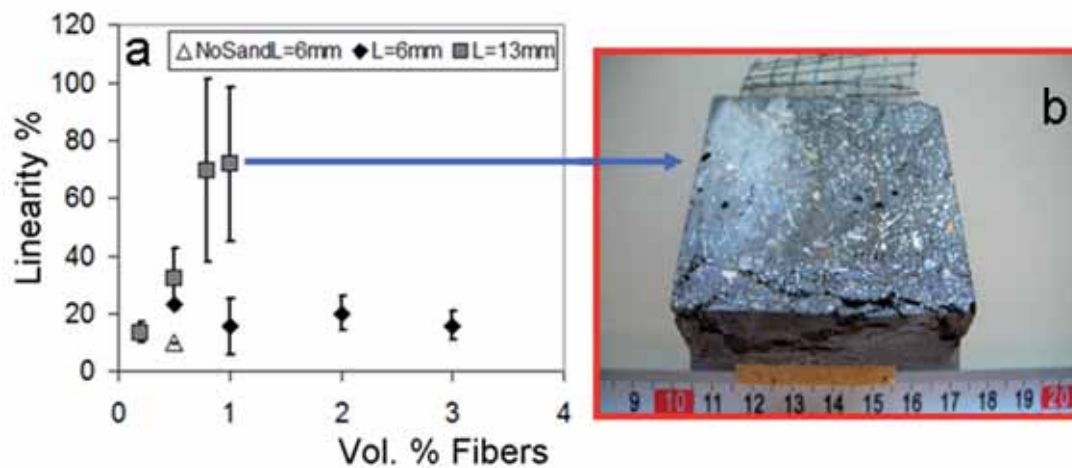
The cross sections of the samples from mixes having fiber length of $L = 13$ mm are presented in Fig. 17b-f. For the mixes 5 and 9 with these fibers, as their volume % increases from 0.2 to 0.5% the stiffness of samples decreases due to high number of voids around fibers. Because of decreasing stiffness and higher volume % of fibers, under deformation, there are more contacts between fibers and their deformation increase so gage factor also increases as in Fig. 17a.

For samples of the mixes with $L = 13$ mm fibers, as volume % increases from 0.5 to 1; the volume % is over percolation threshold, so, the fibers form a closed network conducting the electric current directly. The deformation changes the resistance less by increasing volume %, the gage factor decreases as seen in Fig. 17a.

The increase of fiber volume percent does not affect the linearity for the mixes having $L = 6$ mm fibers (Fig. 18). Linearity is higher for the samples having sand. The fibers agglomerate and distribute unevenly in the mixes having $L = 13$ mm fibers and high fiber volume %. This uneven distribution of fibers cause jumps in the voltage data of CBS (Vs) obtained during loading and increases the linearity (Fig. 18).

4. Conclusions

In order to develop cement based sensor (CBS), electrical resistance measurements were conducted with and without compressive load on the steel fiber reinforced cement composites. Eleven different mixes with different fiber lengths and fiber volume per-



Rys. 18. a) Proporcjonalność pomiarowa w zależności od udziału objętościowego włókien, b) przekrój poprzeczny próbki mającej: włókna o $L = 13$ mm przy udziale 1% objętościowy

Fig. 18. a) The linearity versus the % volume of fibers. b) The cross section of a sample having $L = 13$ mm fibers with 1% volume

cia w sensorach (V_s) powstające podczas obciążania próbek co zwiększa liniowość (rysunek 18).

4. Wnioski

W celu opracowania sensorów opartych na cemencie przeprowadzono pomiary oporności bez i z przyłożonym obciążeniem ściskającym próbek, przy czym zaprojektowano jedenaście różnych mieszanek zawierających różny udział włókien stalowych, o różnej długości. Z każdej mieszanki sporządzono po trzy próbki. Pomiary oporności elektrycznej nieobciążonych próbek wykazała co następuje:

1. W przypadku próbek z mieszanek zawierających włókna o długości $L = 6$ mm w miarę wzrostu ich udziału wzrasta liczba kontaktów włókna-matryca. Każdy taki kontakt zwiększa prawdopodobieństwo powstawania pustek W związku z tym zwiększenie % objętościowego tych włókien pociąga za sobą wzrost porowatości próbek co powoduje wzrost oporności elektrycznej kompozytu.
2. Zwiększenie udziału objętościowego włókien w mieszankach z włóknami o $L = 13$ mm powoduje bezpośredni przepływ prądu przez kontaktujące się włókna i spadek oporności kompozytu.
3. W przypadku tego samego udziału objętościowego włókien próbki z mieszanek z włóknami o $L = 13$ mm mają mniejszą oporność elektryczną w porównaniu z mieszankami zawierającymi włókna o $L = 6$ mm w związku z elektronowym przewodzeniem prądu w próbkach z mieszanek z włóknami o $L = 13$ mm.

Pomiary oporności elektrycznej obciążonych próbek wykazały co następuje:

1. Pod obciążeniem ściskającym oporność elektryczna maleje w wyniku wciskania włókien w matrycę i zamknięcia spękań umożliwiających przewodność w matrycy oraz na styku włókien z matrycą oraz włókien z włóknami.

centages were designed. Three samples from each mix were prepared. The electrical resistance measurements without load revealed the following:

1. In the case of samples of mixes with fibers length $L = 6$ mm, as fibers volume % increases, the amount of fiber – matrix interface increases. Every interface increases the probability of having a void. Thus, the increase of volume % of $L = 6$ mm fibers increases the porosity of the sample, resulting in an increase in electrical resistance of the composite.
2. The increase of fibers volume % for mixes with $L = 13$ mm fibers results in conduction of electric current with direct contact of fibers and decreases the electrical resistance.
3. For the same fiber volume percent, the samples from mixes having fibers of $L = 13$ mm have lower electrical resistance with respect to the mixes having fibers $L = 6$ mm due to electronic conduction of the current in the mixes with $L = 13$ mm fibers.

The electrical resistance measurements with compressive load showed that:

1. Under compressive load, the electrical resistance decreases due to fiber push-in and the crack closure leading to increase in matrix-matrix, fiber-matrix and fiber-fiber conductivity.
2. The commercial metal strain gages have gage factor $K = 2$ while CBS has as high as $K = 30$. The CBS is much more sensitive to strain than metal strain gages.
3. The commercial metal strain gages have a strain limit range of 0.5% - 3% (0.005 - 0.03). The CBS has almost the same strain limit range which makes it a candidate to be a strain sensor.
4. The linearity of CBS is low which means the error in using the regression line for strain estimation for a given change of resistance is low.
5. The evolution of microstructure of the composite determines the critical parameters of gage factor and linearity. The control and manipulation of the microstructure will enhance the

2. Handlowe sensory metalowe mają stałą $K = 2$ natomiast sensory oparte na cemencie znacznie wyższą – $K = 30$. Sensory oparte na cemencie mają znacznie większą czułość na naprężenia niż czujniki metalowe.
3. Handlowe sensory metalowe mają graniczne naprężenie w zakresie od 0,5% do 3% (0,005-0,03). Sensory oparte na cemencie mają prawie taki sam zakres granicznego naprężenia co stwarza możliwość zastosowania ich jako czujników naprężeń.
4. Proporcjonalność pomiarowa sensorów opartych na cemencie jest niska co oznacza, że błąd w stosowaniu liniowej regresji do wyznaczania zmian oporności jest mały.
5. Zmiany mikrostruktury kompozytu wyznacza wartości krytycznych parametrów, to jest stałą sensora i proporcjonalność pomiarową. Wpływ na mikrostrukturę będzie czynnikiem zwiększającym stosowanie sensorów opartych na cemencie. Zmiany stałej czujnika i proporcjonalności pomiarowej w zależności od długości włókien i ich udziału wykorzystano w tych badaniach.

W opublikowanych pracach stosowano włókna węglowe w sensorach opartych na cemencie. Włókna węglowe są znacznie droższe niż stalowe. Także ich rozmieszczenie w matrycy cementowej jest znacznie trudniejsze niż włókien stalowych. Ponadto posługiwanie się włóknami węglowymi jest trudniejsze, gdyż są one łatwo porywane przez prądy powietrzne, zakłócają obwody elektryczne ze względu na ich dużą przewodność i stanowią zagrożenie dla zdrowia. W celu popierania rozwoju technologicznego sensorów opartych na cemencie można stosować włókna stalowe, jak to wykazano w tej pracy.

W tej pracy graniczne naprężenie, które stanowi maksymalne naprężenie, przy którym sensory oparte na cemencie mogą być stosowane jako czujniki naprężeń przy utrzymaniu małego błędu [proporcjonalność] wynosi co najmniej dziesięciokrotną wartość granicznego naprężenia podawanego w literaturze dla sensorach opartych na cemencie. Stanowi więc fantastyczną poprawę granicznego naprężenia spotykanego w sensorach opartych na cemencie, stwierdzone w tej pracy.

Sensory oparte na cemencie będą dalej udoskonalane aby było możliwe ich stosowanie w konstrukcjach betonowych. Będą stosowane w betonach masywnych, obejmujących tamy, a także w nawierzchniach. Gdy ich rozmiary zostaną zmniejszone będą stosowane w prawie wszystkich elementach konstrukcyjnych i mogą stanowić w betonie rodzaj kruszywa. Z uwagi na ich niskie koszty dużą trwałość i czułość pomiarową w stosunku do sensorów metalowych, czujniki oparte na cemencie mogą zastąpić w przyszłości handlowe sensory naprężeń w pewnych zastosowaniach. Sensory oparte na cemencie umożliwią pomiary naprężeń we wnętrzu elementów konstrukcyjnych, a nie tylko na ich powierzchni, które stanowią ograniczenie obecnych czujników metalowych. Dostępne i skuteczne sensory oparte na cemencie otworzą nowe możliwości w przemyśle budowlanym: rozwój inteligentnych betonów, które mogą „znać” panujące w nich naprężenia.

CBS applications. The variation of gage factor and linearity with fiber length and volume percent is explored in this study.

In the literature, carbon fibers were used to develop cement based sensors. The carbon fibers are much more expensive than the steel fibers. Also, their dispersion in the cementitious matrix is much more harder than the dispersion of the steel fibers. Moreover, the handling of the carbon fibers are harder due to their being airborne easily, challenging electric circuits with their high conductivity and human health. In order to promote the technological development of cement based sensors, steel fibers can be used as in this study.

In this work, the strain limit, which is the maximum strain that the CBS can be used as a strain sensor with a very low error (linearity), is at least ten times the strain limits reported in the literature for cement based sensors. Thus, there is a dramatic improvement in the strain limit achieved for cement based sensor with this study.

CBS will be improved to be used in structural applications as a sensor. It will be used in mass concrete applications like concrete dams and pavements. Once the dimensions of CBS is decreased, it will be used in almost all structural elements. While working as a strain sensor in the concrete member, the CBS will act as an aggregate. With its low cost, high durability and sensitivity with respect to metal strain gages, CBS may replace commercial strain gages in the future for some applications. CBS will enable volumetric measurements of strain as it is placed in the structural element, rather than measuring only surface strains as the commercial metal strain gages do. The reliable and efficient use of CBS will open a new era for the construction industry: development of smart concrete which can sense its strain.

Acknowledgement

This work is supported by The Scientific and Technological Research Council of Turkey (TUBITAK) through grant entitled “Cement Based Sensor Development”, no: 110M221. The authors would like to thank to Sika Construction Chemicals Co. for providing the silica fume, methycellulose and superplasticizer and to Bekaert Izmit Steel Cord Co. for providing the steel fibers used in this study.

Literatura / References

1. F. Reza, G. B. Batson, J. A. Yamamuro, J. S. Lee, Resistance changes during compression of carbon fiber cement composites. *J. Mater. Civil. Eng.* 15, 5, 476-483 (2003).
2. D. D. L. Chung, Review functional properties of cement –matrix composites. *J. Mater. Sci.* 36, 1315-1324 (2001).
3. D. D. L. Chung, Self-monitoring structural materials, *Mater. Sci. Eng.* 57-78 (1998).
4. X. Fu, E. Ma, D. D. L. Chung, W. A. Anderson, Self-monitoring in carbon fiber reinforced mortar by reactance measurement, *Cem. Concr. Res.* 27(6), 845-852 (1997).

Podziękowania

Niniejsza praca była finansowana przez TUBITAK w formie Grantu „Opracowanie sensorów opartych na cemencie”, nr 110M221. Autorzy składają także odziękowanie firmie Sika Construction Chemicals Co, która dostarczyła pył krzemionkowy, metylocelulozę i superplastyfikator, a także firmie Bekaert Izmit Steel Cord Co, która dostarczyła włókna stalowe wykorzystane w tej pracy.

5. X. Fu, D. D. L. Chung, Effect of curing age on the self-monitoring behavior of carbon fiber reinforced mortar. *Cem. Concr. Res.* 27(9), 1313-1318 (1997).
6. M. Chiarello, R. Zinno, Electrical conductivity of self-monitoring CFRC. *Cem. Concr. Comp.* 27, 463-469 (2005).
7. B. Han, X. Guan, J. Ou, Electrode design, measuring method and data acquisition system of carbon fiber cement paste piezoresistive sensors. *Sens. and Actuators A* 135, 360-369 (2007).
8. F. Reza, J. A. Yamamuro, G. B. Batson, Electrical resistance change in compact tension specimens of carbon fiber cement composites. *Cem. Concr. Comp.* 26, 873-881 (2004).
9. B. Chen, J. Liu, Damage in carbon fiber –reinforced concrete, monitored by both electrical resistance measurement and acoustic emission analysis. *Constr. Build. Mater.* 22, 2196-2201 (2008).
10. H. Li, H. Xiao, J. Ou, Effect of compressive strain on electrical resistivity of carbon black-filled cement –based composites. *Cem. Concr. Comp.* 28, 824-828 (2006).
11. H. Li, H. Xiao, J. Ou, Electrical property of cement-based composites filled with carbon black under long-term wet and loading condition. *Comp. Sci. Tech.* 68, 2114-2119 (2008).
12. D. D. L. Chung, Cement reinforced with short carbon fibers: a multifunctional material. *Composites Part B: Engineering*, 31, 511-526 (2000).
13. D. D. L. Chung, Cement –based electronics, *J. Electroceramics* 6 (1) 75-88 (2001).
14. European Committee for Standardization, Cement - Part 1: Composition, specifications and conformity criteria for common cements. EN 197-1: 2000, Brussels.