



Stefan Kubica

*Instytut Przetwórstwa Tworzyw Sztucznych w Toruniu, Oddział Zamiejscowy Farb i Tworzyw w Gliwicach, ul. Chorzowska 50A, 44-100 Gliwice, Poland
e-mail: S.Kubica@ipts.pl*

Otrzymano (Received) 27.01.2007

MINERALNE KOMPOZYTY SPOIOWE DO ZASTOSOWAŃ W BUDOWNICTWIE LĄDOWO-WODNYM I PODZIEMNYCH WYROBISKACH GÓRNICZYCH

Przedstawiono wyniki badań nad opracowaniem technologii otrzymywania i przetwarzania typoszeregu suchych mieszanek spoiwowo-mineralnych, które w reakcji z wodą wykazują zdolność do hydratacji i tworzenia zwięzłej masy o planowanych parametrach fizykochemicznych. Materiały tego typu znajdują zastosowanie w budownictwie lądowo-wodnym i górnictwie, gdzie przeznaczone są do konsolidacji słabo związanego górotworu, budowy konstrukcji szybko podporowych, wypełniania pustych przestrzeni i szczelin, iniekcji górotworu w celu jego wzmocnienia, budowy pasów i korków izolacyjnych i tam przeciwybuchowych, mocowania urządzeń, kotew i innych elementów, np. kanałów konstrukcji sprężonych, do wypełniania wykopów, przepustów, do konstrukcji budowlanych i izolacyjnych oraz alternatywnie jako materiał na podbudowę dróg i autostrad. Dodatkowym efektem użytecznym opracowanych technologii jest wykorzystanie odpadowych substancji mineralnych, takich jak np. segregowane popioły lotne z elektrowni węglowych (sztuczna pucolana), oraz możliwość wytwarzania i przetwarzania suchych mieszanek spoiw mineralnych w sposób ciągły.

Słowa kluczowe: kompozyty mineralno-spoiwowe, spoiwo iniekcyjne, cementy portlandzkie, popioły lotne, domieszki

MINERAL BINDER COMPOSITES FOR CIVIL ENGINEERING AND UNDERGROUND EXCAVATIONS

The results of studies on the development of technology and processing of dry mineral-binder mixtures series of types, which were to be able to hydration and forming of compact mass of designed physicochemical parameters during the reaction with water, were presented in this article. The materials of this type are used in civil engineering and mining for consolidation of poor bounded rock mass, making of quick support constructions, filling of empty spaces and gaps, injection of rock mass enabling its strengthening, performing of belts and insulation plugs, making of explosion-proof stopping, fastening of installations, anchors and other elements like channels of prestressed constructions, filling of excavations and culverts, building and insulation structures and alternatively as materials for road and highway foundation. The additional advantage of developed technologies is utilization of waste mineral substances like classified fly ashes produced in big power plants (artificial pozzolana) and the possibility of continuous manufacturing and processing of dry mineral mixtures.

Keywords: mineral-binder composites, injection binder, Portland cements, fly ashes, admixtures

WPROWADZENIE

Znane są technologie wytwarzania tworzyw budowlanych przeznaczonych do specyficznych zastosowań w budownictwie, charakteryzujących się wyżej wymienionymi właściwościami lub posiadających podobne zastosowanie. Tworzywa te wytwarza się głównie w oparciu o szeroko znane spoiwa, jakimi są cementy portlandzkie, wapno hydratyzowane i znane wypełniacze, takie jak: kruszywa naturalne, zarówno łamane, jak i otoczkowe, oraz piasek płukany lub kopalny. Uwzględniając właściwości tych surowców wsadowych, otrzymywane z nich tworzywa mają charakter betonów

zwykłych, których gęstość oscyluje w granicach od 2,2 do 2,6 kg/m³. Opisane wyżej spoiwa odpowiadają wymaganiom stawianym materiałom podsadzkowym o dużej wytrzymałości do około 50 MPa. Wytrzymałość mechaniczna tych tworzyw zależy od ilości zastosowanego spoiwa oraz jego stosunku wagowego do wody jako podstawowego czynnika przebiegu reakcji hydratacji spoiwa cementowego. Do tej grupy spoiw można zaliczyć produkowane w krajach zachodnich spoiwa iniekcyjne stosowane do iniekcji pustych przestrzeni za segmenty betonowe, konsolidacji górotworu, wypełnia-

nia pustek za obudową tuneli, chodników i szybów, wzmocnienia górotworu, do kotwi kablowych itp., takie jak np. spoiwa typoszeregu 80/20 i CBG, Nitrolor, Renderoc LA i inne podobnego typu.

Tworzywa zawierające mniejszą ilość składników spoiwowych i wykazujące niższą wytrzymałość nazywa się popularnie betonami chudymi, spoiwa odpowiadają wymaganiom stawianym materiałom podsadzkowym o średniej wytrzymałości do około 20÷30 MPa. Podobnie jak w przypadku spoiw o dużej wytrzymałości, wytrzymałość mechaniczna tych tworzyw zależy od ilości zastosowanego spoiwa oraz jego stosunku wagowego do wody jako podstawowego składnika do hydratacji spoiwa cementowego. Do tej grupy spoiw można zaliczyć produkowane w firmach zagranicznych spoiwa iniekcyjne do wypełniania przestrzeni za segmentami betonowymi, konsolidacji górotworu, wypełniania pustek za obudową tuneli, wzmocnienia górotworu itp., takie jak np. spoiwa typoszeregu GP Grout, TRD 61, Renderoc GP, Renderoc HB Cemtop GP30 i inne.

Niezależnie od wielu korzystnych cech dotyczących właściwości mechanicznych wadą tworzyw z grupy tak zwanych betonów chudych jest stosunkowo duża gęstość, mała rozlewność, zła pompowalność, skłonność do sedymentacji, segregacji składników i rozwarstwiania, zwłaszcza w trakcie, koniecznego ze względu na konsystencję, zagęszczania lub wibrowania. Opisane wyżej wady wynikają głównie z dużych różnic uziarnienia pomiędzy spoiwem a wypełniaczami mineralnymi.

W celu eliminacji opisanych wyżej wad podjęto badania nad opracowaniem technologii wytwarzania różnych spoiw, w tym także spoiwa o małej wytrzymałości do około 5÷10 MPa przeznaczonego do wypełniania pustek. Tworzywa te pełnią funkcję betonów ekspansyjnych, czyli osiągających podane wyżej wytrzymałości, zachowujących jednocześnie dobrą rozlewność, niski skurcz lub nawet lekką ekspansję, niską skłonność do sedymentacji, segregacji składników i rozwarstwiania, a jeżeli jest to wymagane, także właściwości tiksotropowe, i zaliczane są do grupy tak zwanych betonów lekkich, których gęstość wynosi od 1,3 do 1,65 Mg/m³. Spoiwa tej grupy podobnie jak w przypadku spoiw o dużej i średniej wytrzymałości stanowią porównawczo lepszej jakości krajowe odpowiedniki spoiw produkowanych w krajach zachodnich.

CEL BADAŃ

Celem głównym zrealizowanych badań było opracowanie technologii otrzymywania i przetwarzania typoszeregu suchych mieszanek spoiwowo-mineralnych i betonu natryskowego (torkretu). Prace badawcze skupione zostały na opracowaniu technologii wytwarzania czterech rodzajów spoiw, różniących się wytrzymałością mechaniczną:

- 1) spoiwa o dużej wytrzymałości, do około 60 MPa, oznaczonego dalej jako MD-60,
- 2) spoiwa o średniej wytrzymałości, do około 20÷30 MPa, oznaczonego dalej jako MD-30,
- 3) spoiwa do wypełniania pustek o małej wytrzymałości, do około 15 MPa, oznaczonego dalej jako MD-15,
- 4) betonu natryskowego o wytrzymałości umownej powyżej 70 MPa, oznaczonego dalej jako MD-T.

Spoiwa miały cechować się:

- dobrą mieszalnością z wodą,
- łatwością pompowania na znaczne odległości (powyżej 100 m),
- alternatywną możliwością transportu pneumatycznego spoiwa i mieszania go z wodą w dyszy podającej w miejscu aplikacji,
- typoszeregiem czasów wiązania - od szybkiego (początek po około 20÷30 minutach, koniec po 40÷50 minutach) do wolnego (początek po około 2÷3 godzinach, koniec po 7÷8 godzinach),
- szybkim wzrostem wytrzymałości (około 3 MPa po 2 godzinach i około 10 MPa po 8 godzinach - dotyczy spoiw o średniej i dużej wytrzymałości),
- jak najniższym kosztem produkcji,
- możliwością przechowywania przez minimum 6 miesięcy,
- jak najmniejszą ilością materiału, który należy transportować do miejsca aplikacji, przez zapewnienie wysokiej wydajności objętościowej z 1 Mg materiału,
- brakiem skurczu, a nawet lekką ekspansją,
- zdolnością wiązania z wodą bez dostępu powietrza,
- nietoksycznością w stosunku do środowiska.

Bardzo ważne są również inne pożądane właściwości użytkowe spoiw, takie jak nieprzepuszczalność dla wody i gazu oraz termoizolacyjność.

Specyficzne warunki pracy w budownictwie zwłaszcza pod ziemią wymagają, by procedura aplikacji była prosta i aby materiał dało się stosować nawet w przypadku niepełnego dostosowania się do tej procedury, a zwłaszcza szerokiego zakresu temperatury stosowania od 15 do 30°C i ograniczonej dokładności w odmierzaniu wody zarobowej (do około ±5%).

ZAKRES BADAŃ I METODYKA

Badania nad opracowaniem technologii otrzymywania spoiw były prowadzone zarówno w skali laboratoryjnej, jak i na instalacji technicznej, bezpośrednio w warunkach wyrobiska podziemnego. Badania w skali laboratoryjnej obejmowały wstępne przebadanie wpływu rodzaju i ilości wybranych składników i domieszek na proces formowania i wiązania wieloskładnikowej mieszanki podsadzkowej oraz ich wpływu na właściwości fizykochemiczne otrzymywanego produktu gotowego, a w szczególności na: czas wiązania, gęstość,

wytrzymałość mechaniczną. Na podstawie przeprowadzonych badań wstępnych wykonano optymalizację procesu zarówno pod względem składu chemicznego mieszaniny, jak i pod względem stosowanych parametrów jej przetwarzania.

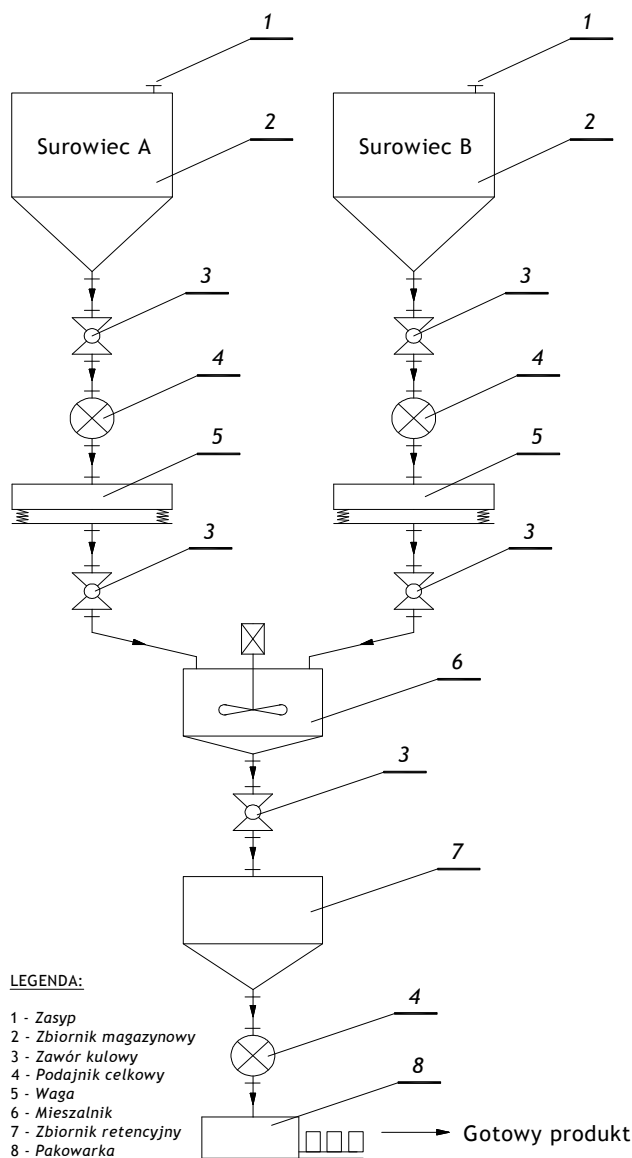
Proces wytwarzania spoiw, w tym spoiw o niskiej gęstości w warunkach laboratoryjnych, prowadzony był z wykorzystaniem mieszalnika laboratoryjnego stosowanego do ujednorodniania substancji stałych oraz w mieszalniku używanym do przygotowania zapraw. Badanie właściwości przetwórczych oraz właściwości fizykochemicznych otrzymywanych materiałów przeprowadzane były zgodnie z obowiązującymi w tym zakresie Polskimi Normami.

Badania na skalę techniczną przeprowadzone były z wykorzystaniem przemysłowej instalacji do produkcji suchych mieszanek spoiwowych, mieszalników i agregatów pompowych stosowanych w budownictwie i w podziemnych wyrobiskach górniczych. Właściwości opracowywanych suchych mieszanek spoiwowo-mineralnych oraz właściwości produktu gotowego były badane przez oznaczanie odpowiednich parametrów wyspecyfikowanych w procedurach kontrolno-pomiarowych.

Podstawowymi składnikami wiążącymi zastosowanymi w badaniach nad wytwarzaniem suchych mieszanek spoiwowo-mineralnych typu MD były krajowe spoiwa cementowe oraz dodatki mineralne, domieszki i wypełniacze. Wypełniaczami stosowanymi do wytwarzania suchych mieszanek były w szczególności różnego rodzaju glinokrzemiany naturalne lub sztuczne, w tym klasyfikowane popioły lotne. Zastosowanie odpowiednich wypełniaczy pozwoliło na opracowanie ekonomicznie korzystnych receptur bez pogorszenia ich właściwości.

Podstawowym wymogiem, niezależnie od uzyskania korzystnych właściwości fizykochemicznych i optymalnych czynników ekonomicznych, było zapewnienie właściwej ochrony zdrowia ludzi i zwierząt zarówno podczas prac badawczych, jak i podczas prac wdrożeniowo-produkcyjnych. Realizacja tego wymogu polegała na wyeliminowaniu ujemnego wpływu na otoczenie zarówno surowców wyjściowych, jak i produktu gotowego, poprzez wprowadzenie określonych procedur wykonawczych oraz wybór takich dostępnych substancji składowych, aby tego typu zagrożenie nie wystąpiło.

Badania przeprowadzono w modelowym układzie aparaturowym, którego schemat ideowy modułu podstawowego typowej instalacji do wytwarzania suchej mieszanki spoiwowej przedstawiono na rysunku 1. Urządzeniami do przetwarzania suchych mieszanek spoiwowych na docelowy wyrób były agregaty mieszająco-pompujące, np. ślimakowe typu „mono”, i perystaltyczne typu „Fama”, stosowane odpowiednio do podawania mieszaniny wodno-spoiwowej w postaci rzadkiej i gęstej. Ponadto stosowane były zespoły mieszająco-pompujące, złożone z mieszalnika i sprzężonej z nim pompy.



Rys. 1. Schemat ideowy modułu podstawowego instalacji produkcyjnej suchych mieszanek mineralnych

Fig. 1. The schematic diagram of the base module of the plant for dry mineral binder mixture production

Do podstawowych parametrów, które charakteryzują cechy użytkowe i fizykochemiczne poszczególnych półproduktów i produktu gotowego, należą:

- dla suchej mieszanki: gęstość nasypowa, gęstość pozorną, gęstość rzeczywistą, skład ziarnowy, okres składowania,
- dla zaczynu spoiwowego: czas żelowania dla określonego stosunku woda/spoiwo - w/s, rozlewność, czas pompowalności, czas początku i końca wiązania,
- dla utwardzonego produktu gotowego: gęstość pozorną, wytrzymałość mechaniczną na zginanie i ściskanie, współczynnik ekspansji objętościowej.

Badania tych właściwości fizykochemicznych przeprowadzono z wykorzystaniem nowoczesnej aparatury badawczej w laboratorium Instytutu akredytowanego w PCA.

WYNIKI BADAŃ

W wyniku przeprowadzonych prac badawczych opracowano technologię wytwarzania czterech rodzajów produktów, których charakterystyki fizykochemiczne podano poniżej.

Spoiwo MD-60

Spoiwo MD-60 to proszek koloru szarego, niepalny, nietoksyczny, który po zmieszaniu z zalecaną ilością wody posiada dobrą pompowalność. Jego właściwości zestawiono w tabeli 1.

TABELA 1. Właściwości przetwórcze i fizykomechaniczne spoiwa M-60

TABLE 1. The processing and physico-mechanical properties of the binder M-60

Stosunek woda/spoiwo w/s	Początek wiązania wg Vicata w 20°C, min	Koniec wiązania wg Vicata w 20°C, h	Wydajność m ³ /Mg	Gęstość, kg/m ³	Wytrzymałość na ściskanie w MPa po czasie sezonowania:		
					3 dni	7 dni	28 dni
					0,37	315	8
0,35	290	6	0,75	1,99	38,60	47,80	73,63

Spoiwo MD-30

Spoiwo MD-30 to, podobnie jak spoiwo MD-60, proszek koloru szarego, niepalny i nietoksyczny, po zmieszaniu z zalecaną ilością wody charakteryzuje się dobrą pompowalnością (tab. 2).

TABELA 2. Właściwości przetwórcze i fizykomechaniczne spoiwa MD-30

TABLE 2. The processing and physico-mechanical properties of the binder M-30

Stosunek woda/spoiwo w/s	Początek wiązania wg Vicata w 20°C, min	Koniec wiązania wg Vicata w 20°C, h	Wydajność zaczynu m ³ /Mg	Gęstość, kg/m ³	Czas sezonowania		Wytrzymałość na ściskanie, MPa
0,40	30	1	0,85±0,86	1,82±1,86	30 min	0,01	
					40 min	0,35	
					60 min	0,6	
					2 h	2,3	
					4 h	4,5	
					3 dni	20,0	

Spoiwo MD-15

Spoiwo MD-15 jest materiałem o strukturze proszku koloru szarobrazowego, niepalnym i nietoksycznym,

charakteryzującym się właściwościami przetwórczymi i fizykomechanicznymi zestawionymi w tabeli 3 oraz:

- gęstością rzeczywistą suchego spoiwa równą 1,945 kg/m³,
- czasem żelowania 7+10 min,
- czasem pompowalności 15 min,
- początkiem wiązania wg Vicata przy 20°C wynoszącym nie mniej niż 30 min,
- po zmieszaniu z zalecaną ilością wody dobrą pompowalnością.

TABELA 3. Właściwości przetwórcze i fizykomechaniczne spoiwa MD-15

TABLE 3. The processing and physico-mechanical properties of the binder M-15

Wskaźnik w/s	Wydajność zaczynu z 1 Mg suchej mieszanki	Gęstość pozorna zaczynu surowego kg/m ³	Wytrzymałość na zginanie w MPa po czasie sezonowania:			Wytrzymałość na ściskanie w MPa po czasie sezonowania:		
			2 h	1 d	3 d	2 h	1 d	3 d
			1,0	1,36	1470	0,70	1,13	2,87
1,2	1,54	1430	0,45	1,25	2,96	1,43	8,10	12,00
1,4	1,72	1390	0,30	0,83	2,59	1,10	3,72	10,00
1,6	1,91	1360	0,20	0,85	1,95	0,80	2,62	9,00
1,8	2,09	1340	0,17	0,41	1,98	0,56	1,85	5,70
2,0	2,28	1320	0,14	0,43	1,11	0,46	1,33	3,00
2,2	2,47	1300	0,11	0,39	0,78	0,35	0,88	1,00

Do produkcji spoiw podanych w powyższych charakterystykach używany jest odpowiedni cement oraz dodatek pucolanowy, co powoduje, że maksymalna zawartość alkaliów w utwardzonym spoiwie jest niższa niż w identycznych spoiwach cementowych. Dla porównania należy podać, że zawartość alkaliów w typowych cementach portlandzkich może wynosić od 0,6 do 1%, zaś w przedmiotowym spoiwie ilość alkaliów jest niższa o minimum 20% podanej wyżej wartości.

Zawarta w mieszance sztuczna - reaktywna pucolana powoduje znaczne obniżenie poziomu wolnego wodorotlenku wapniowego w związanym spoiwie. Jak wiadomo, wolny wodorotlenek wapniowy jest powodem zachodzenia niekorzystnych reakcji (powodujących niszczenie związanego spoiwa) z niektórymi składnikami wód gruntowych. Znaczne zmniejszenie poziomu zawartości wolnego wodorotlenku wapniowego powoduje, że opisane wyżej spoiwa wykazują wysoką odporność na działanie agresywnych wód gruntowych.

Torkret MD-T

Do produkcji spoiwa MD-T zastosowano podstawowe składniki, takie jak: kruszywo, cement portlandzki CEM I 42,5, aktywne wypełniacze oraz domieszki modyfikujące właściwości przetwórcze i użytkowe, co powoduje, że charakteryzuje się on zarówno właściwościami przetwórczymi, zobrazowanymi w tabeli 4, jak również tym, że:

- maksymalna zawartość alkaliów wynosi 3 kg/m^3 torkretu,
- wskaźnik pH spoiwa jest wyższy od 11,6, co gwarantuje depasywację stali zbrojeniowej,
- czas wiązania torkretu przy 20°C wynosi około $2\div 3$ godziny.
- posiada on znacząco zredukowany odpad,
- osiąga wartości współczynnika rozszerzalności termicznej na poziomie $13 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$, w porównaniu do $12 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ dla zwykłego betonu,
- wykazuje skurcz po 28 dniach na poziomie $0.03\div 0.05\%$ w porównaniu do $0,08\%$ dla betonu zwykłego,
- wykazuje nasiąkliwość na poziomie $1,6\div 2,0\%$ w porównaniu do 5% dla betonu zwykłego,
- posiada dobrą przyczepność do betonu starego - zależną od przygotowania powierzchni i siły kohezji betonu starego,
- statyczny moduł elastyczności wynosi około $30,0 \text{ kN/mm}^2$, w porównaniu do $21\div 55 \text{ kN/mm}^2$, dla betonów zwykłych, znosi minimum 200 cykli zamrażanie/odmrażanie bez wystąpienia odprysków,
- współczynnik karbonizacji wynosi mniej niż 1 mm/rok w porównaniu do 2 mm/rok dla betonu zwykłego,
- gęstość wynosi $2260\div 2270 \text{ kg/m}^3$,
- jego wydajność wynosi $0,50 \text{ m}^3/\text{Mg}$ przy $w/s = 0,14$.

TABELA 4. Właściwości przetwórcze i fizykomechaniczne spoiwa MD-T

TABLE 4. The processing and physico-mechanical properties of the binder MD-T

Wskaźnik w/s	Wydajność betonu z 1 Mg suchego torkretu, m^3	Zużycie suchego torkretu na 1 m^3 betonu torkretowego Mg	Wytrzymałość minimalna na zginanie w N/mm^2 po dniach sezonowania				Wytrzymałość minimalna na ściskanie w N/mm^2 po dniach sezonowania			
			1 dzień	3 dni	7 dni	28 dni	1 dzień	3 dni	7 dni	28 dni
0,125	0,494	2,024	5,0	7,5	9,5	10,4	40	60	70	77

WNIOSKI

Technologie otrzymywania specjalistycznych spoiw, w tym spoiw do podszadek i materiałów wypełniających o niskiej gęstości - będących przedmiotem prac badawczych, można zaliczyć do wysoko zaawansowanych technologii m.in. z uwagi na aspekty proekologiczne oraz brak odpadów.

Technologie te są przyjazne dla środowiska, nie powodują zanieczyszczenia wody, gleby i powietrza (brak emisji lotnych związków organicznych LZO), a otrzymane produkty spełniają wymagania standardów UE. Należy także zauważyć, że do opracowanych technologii produkcji mineralnych kompozytów spoiwowych jako surowce zostały wykorzystane produkty odpadowe - uboczne z energetycznego przetwarzania węgla kamiennego.

LITERATURA

- [1] Maryniak-Piaszczyńska E., Badania nad technologią mas iniekcyjnych na bazie wapna dyspergowanego do konserwacji kamieni, Praca doktorska, UMK, Toruń 2004.
- [2] Chudek M., Janiczek S., Plewa F., Materiały w budownictwie geotechnicznym, T. II, Klasyczne materiały wiążące oraz materiały z surowców uciążliwych dla środowiska, Wyd. I, 2001.
- [3] VHDRS® Nowa generacja materiałów do naprawy i ochrony żelbetu oferuje wydłużenie życia konstrukcji, OTiK spółka z o.o., Gdańsk 2000.
- [4] Materiały konferencyjne Popioły z energetyki - Nowoczesne technologie zagospodarowania, VI MKNT, październik 1999.
- [5] Kurdowski W., Chemia cementu, WN PWN, Warszawa 1991.
- [6] Jamroży Z., Technologia betonu, Wyd. II, Politechnika Krakowska, Kraków 1978.
- [7] Neville A.M., Właściwości betonu, Arkady, Warszawa 1977.
- [8] Ratinow W.B., Rozenberg T. I, Dodatki do betonu, Arkady, Warszawa 1977.
- [9] Joisel A., Admixtures for cement, Politechnika Paryska, Paryż 1973.
- [10] Lea F.M., The Chemistry of Cement and Concrete, 3rd ed., Edward Arnold, London 1970.
- [11] Bukowski B., Technologia betonu, T. I, cz. 1, Budownictwo betonowe, Arkady, Warszawa 1963.
- [12] Robson T.D., High alumina cements and concretes, Contractor Record, London 1962.