

*Henryk Szelaq\**, *Wiesław Kurdowski\*\**

## CEMENTY SPECJALNE DLA BUDOWNICTWA PODZIEMNEGO

---

### 1. Wprowadzenie

Budownictwo podziemne stawia duże wymagania odnośnie stosowanych do jego realizacji zapraw i betonów. Dotyczą one w pierwszym rzędzie szybkości twardnienia, która w wielu przypadkach powinna zapewniać dużą wytrzymałość już po jednym dniu, a więc w okresie nie ujętym w odpowiednich normach. Równocześnie wytrzymałość ta powinna być znaczna także po 28 dniach twardnienia, spełniająca wymagania klasy betonu 60/65, co odpowiada kompozytom zaliczanym do BWW. Z drugiej jednak strony zatrzymanie wycieków wodnych występujących dosyć często w niektórych wyrobiskach wymaga zastosowania specjalnych zaczynów o bardzo krótkim czasie wiązania, natomiast ich wytrzymałość po stwardnieniu nie musi być zbyt wysoka.

Druga grupa wymagań związana jest z dużą trwałością tych betonów, a przede wszystkim z odpornością na korozyjne działanie wód kopalnianych, zawierających często duże stężenia chlorków oraz siarczanów. Stosowane w tym środowisku zaprawy i betony powinny wyróżniać się w pierwszym rzędzie bardzo małą przepuszczalnością, co wymaga wyeliminowania w tych kompozytach mikropęknięć i porów „przelotowych”, które pozwalają na migrację agresywnych roztworów do wnętrza betonu. Jedynym mechanizmem transportu jonów do wnętrza betonu agresywnych składników roztworu pozostaje w tych warunkach dyfuzja, której przebieg jest o kilka rzędów wielkości wolniejszy od migracji roztworu. Ma to tym większe znaczenie w warunkach kopalnianych, że występujące w wyrobiskach roztwory często znajdują się pod dużym ciśnieniem hydrostatycznym.

Dobór rodzaju cementów stosowanych do wykonywania zapraw i betonów w wyrobiskach kopalnianych posiada w tym świetle podstawowe znaczenie. Jak wiadomo bowiem o powstawaniu mikropęknięć w betonie decydować będą właściwości fizykochemiczne ma-

---

\* Instytut Szkła, Ceramiki, Materiałów Ogniotrwałych i Budowlanych, Warszawa

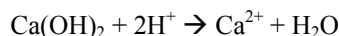
\*\* Oddział Mineralnych Materiałów Budowlanych, Kraków

trycy cementowej, jej skurcz i ciepło hydratacji. To ostatnie ma decydujące znaczenie w przypadku masywnych betonów, do których zaliczamy już elementy o grubości 50 cm. W końcu nawet beton o małej przepuszczalności narażony jest na dyfuzyjne wnikanie jonów, w przypadku których efektywny współczynnik dyfuzji ma stosunkowo dużą wartość. Wówczas dużą rolę zaczyna odgrywać fazowy skład zaczynu, a szczególnie zawartość portlandytu i uwodnionych glinianów wapniowych. W takich przypadkach duże znaczenie mają dodatki pucolanowe. Z kolei skurcz bywa niekorzystną właściwością betonu, powodującą często powstawanie rys w dużych elementach betonowych [1]. Z tego względu stosuje się do wytwarzania betonu cementy ekspansywne, lub o skompensowanym skurczu. Te pierwsze służą także często do wykonywania napraw uszkodzonych konstrukcji betonowych, gdyż tylko betony z cementów ekspansywnych pozwalają na szczelne wypełnienie ubytków spowodowanych spękaniami lub korozją elementów betonowych [2].

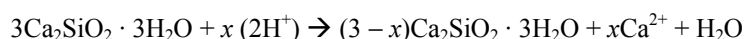
Niniejszy artykuł jest poświęcony rozwiązaniom materiałowym opracowanym w Oddziale Mineralnych Materiałów Budowlanych Instytutu Szkła, Ceramiki, Materiałów Ogniotrwałych i Budowlanych w Krakowie, zajmującym się materiałami budowlanymi. Opracowane w Oddziale Mineralnych Materiałów Budowlanych technologie i wytwarzane materiały bądź w formie cementów lub gotowych, suchych mieszanek zapraw i betonów pozwalają na wykonywanie elementów konstrukcyjnych przeznaczonych do pracy w ekstremalnie niekorzystnych warunkach. Do rozwiązań tych należą także cementy lub gotowe mieszanki, które mogą być stosowane do prowadzenia napraw zniszczonych elementów konstrukcji betonowych.

## 2. Przykłady kilku mechanizmów niszczenia betonu

Jak wiadomo beton tworzy środowisko bardzo zasadowe, o pH bliskim 13 lub nawet nieco wyższym, w zależności od zawartości sodu i potasu w cemencie i stosunku  $w/c$  w betonie [3]. Stosunek ten wpływa bowiem bardzo mocno na siłę jonową roztworu w porach betonu [4]. Natomiast w środowisku o mniejszym pH, szczególnie poniżej 10, fazy występujące w zaczynie nie są trwałe i ulegają rozpadowi na bezpostaciowy żel krzemionki i wodorotlenku glinu oraz krystaliczne formy gipsu i kalcytu. Beton, oprócz małej przepuszczalności, posiada także inne, chemiczne mechanizmy obrony, w postaci reakcji buforowych [5]. Pierwszym buforem jest wodorotlenek wapnia, który reaguje z jonami wodorowymi, a w zasadzie hydroniowymi, w myśl reakcji:

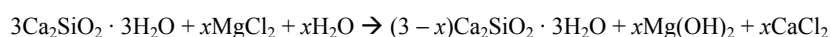
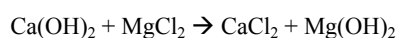


Następnym buforem jest faza C-S-H, która reaguje w analogiczny sposób, ulegając odwapnieniu:



Obie reakcje mają jednak swoją granicę, którą stanowi wyczerpanie się wodorotlenku wapniowego oraz odwapnienie fazy C-S-H, która jest trwała do stosunku molowego Ca/Si wynoszącego 0,63. Z tego względu ważne znaczenie ma mała przepuszczalność betonu, co pozwala na dużą trwałość betonu w środowisku agresywnym chemicznie.

W wodach kopalnianych występują roztwory chlorków o znacznym stężeniu. Produktami reakcji tych chlorków z matrycą cementową są ekspansywne, zasadowe chlorki wapnia lub magnezu, które prowadzą do zniszczenia betonu. Największą agresywność wykazuje chlorek magnezu, bowiem w jego przypadku następuje powstawanie żelowego brucytu  $[Mg(OH)_2]$  [6]. Kilka przykładowych reakcji można zapisać schematycznie:

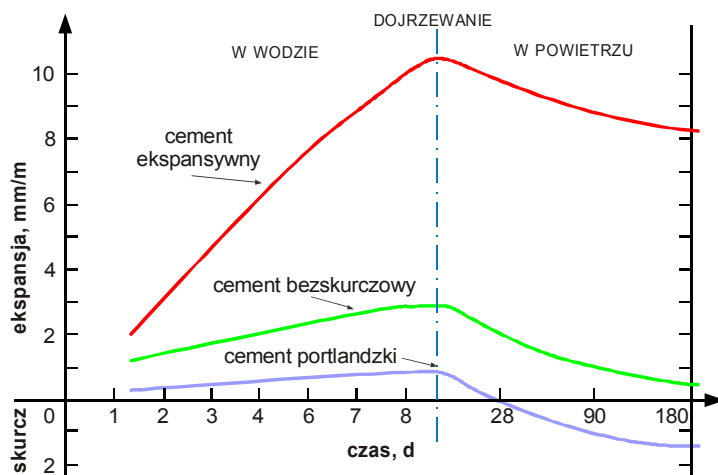


W wodach kopalnianych rzadziej występują roztwory siarczanów w większym stężeniu, jeżeli jednak taki przypadek miałby miejsce, to reakcje w przypadku siarczanu magnezu, o największej agresywności, przebiegałyby w podobny sposób, jednak w miejsce zasadowych chlorków wapnia i magnezu, powstawałyby ekspansywne ettringit i gips.

Większą trwałość w przypadku korozji chlorkowej i siarczanowej wykazują cementy z dużą zawartością pucolanowych dodatków mineralnych, przede wszystkim granulowanego żużla wielkopieczowego i popiołów lotnych. Mają one korzystniejszą mikrostrukturę oraz znacznie mniejszą zawartość portlandytu, a więcej fazy C-S-H. Z tego względu w przypadku potencjalnych możliwości korozji chlorkowej lub siarczanowej należy stosować cementy CEM II/B-V-S lub CEM III/A względnie CEM III/B.

### **3. Właściwości specjalnych cementów i mieszanek wytwarzanych w Oddziale Mineralnych Materiałów Budowlanych Instytutu Szkła, Ceramiki, Materiałów Ogniotrwałych i Budowlanych w Krakowie**

W Oddziale Mineralnych Materiałów Budowlanych opracowano szereg technologii wytwarzania cementów o skompensowanym skurczu oraz ekspansywnych, które są produkowane w Zakładzie Doświadczalnym w znacznych ilościach. Jako matrycę stosuje się, w zależności od środowiska w jakich będzie eksploatowany beton, cement portlandzki CEM I i CEM II/B-V oraz CEM II/B-S, lub CEM III/A. W tej grupie cementów znajdują się cementy o skompensowanym skurczu i ekspansywne (rys. 1). Te ostatnie mogą wyróżniać się specjalnie dobraną rozszerzalnością od stosunkowo niewielkiej, leżącej w granicach od kilku dziesiątek milimetrów na metr do znacznej, wynoszącej 40 mm/m i więcej. Cementy te mogą wykazywać także różny poziom naprężeń od niskich, około 0,5 do dużych sięgających 4 MPa.



Rys. 1. Zmiany liniowe zapraw z cementów ekspansywnych (schematycznie)

Wytrzymałość cementów ekspansywnych zależy przede wszystkim od właściwości matrycy i może osiągać wysoki poziom, na przykład w przypadku stosowania do ich produkcji cementów klas 42,5 R lub 52,5 R. Także odporność na środowisko korozyjne zależy od rodzaju cementu stanowiącego matrycę i w tym celu można na przykład stosować CEM II/B-V lub CEM III/A. W tabeli 1 podano przeciętne właściwości cementu ekspansywnego z matrycą z cementu CEM I 42,5 R.

W Zakładzie Doświadczalnym Oddziału Mineralnych Materiałów Budowlanych Instytutu Szkła, Ceramiki, Materiałów Ogniotrwałych i Budowlanych w Krakowie wytwarzanych jest także cały szereg suchych, gotowych mieszanek zapraw i betonów o bardzo dużej wytrzymałości i bardzo niewielkim skurczu. Przykładowo omówimy właściwości kilku wybranych rodzajów mieszanek zapraw i betonów, w tym także przeznaczonych specjalnie do napraw uszkodzonych konstrukcji betonowych.

Materiały te są przeznaczone przede wszystkim do wybranych zastosowań, na przykład elementy betonowe o wysokiej wytrzymałości, fundamenty pod ciężkie maszyny, spoiwa do mocowania kotew, w tym szczególnie w kopalniach. Są one także stosowane do napraw tam i zapór, chłodni kominowych, w tym również do napraw szybów kopalnianych. Trzeba podkreślić, że produkowane suche mieszanki mogą posiadać szereg specjalnych właściwości, które są dobierane do stopnia uszkodzenia elementu betonowego, jego powierzchni i objętości, a przede wszystkim do rodzaju betonu podlegającego naprawie.

W kolejnych tabelach podano podstawowe właściwości tych zapraw i betonów w porównaniu do klasycznego BWW. Właściwości te badane były klasycznymi metodami podanymi w normach, a mianowicie zaprawy głównie według PN-EN 196, a także według PN-EN 1015-3 (konsystencja), natomiast betony według PN-EN 12350 i PN-EN 12390. Skurcz mierzono zgodnie z ASTM C157-93, a nasiąkliwość według starej normy polskiej PN 88/B-06250, zastąpionej przez PN-EN 206-1.

TABELA 1

## Właściwości cementu ekspansywnego z matrycą z CEM I 42,5 R

	Właściwość	Metoda badania	Wynik badania
Cement	Powierzchnia właściwa, cm <sup>2</sup> /g	PN-EN 196-6	3200
Zaczyn	Właściwa ilość wody, %	PN-EN 196-3	25,5
	Czas wiązania:	PN-EN 196-3	60 100
	– początek po upływie, min – koniec po upływie, min		
Zaprawa 1:3	Plastyczność zaprawy (rozpliw), mm	PN-EN 13454-2	170
	w/c		0,5
	Wytrzymałość zapraw na zginanie, MPa:	PN-EN 196-1	2,0 4,7 5,8 6,5 7,0
	– po upływie 24 godzin		
	– po upływie 2 dni		
	– po upływie 7 dni		
	– po upływie 28 dni		
	– po upływie 90 dni		
	Wytrzymałość zapraw na ściskanie, MPa:	PN-EN 196-1	8,6 26,4 34,6 46,7 51,3
	– po upływie 24 godzin		
– po upływie 2 dni			
– po upływie 7 dni			
– po upływie 28 dni			
– po upływie 90 dni			
Zaprawa 1:1	Plastyczność zaprawy (rozpliw), mm	PN-EN 13454-2	135
	w/c		0,4
	Wytrzymałość zapraw na zginanie, MPa:	PN-EN 196-1	3,6 6,1 7,2 8,5 8,8
	– po upływie 24 godzin		
	– po upływie 2 dni		
	– po upływie 7 dni		
	– po upływie 28 dni		
	– po upływie 90 dni		
	Wytrzymałość zapraw na ściskanie, MPa:	PN-EN 196-1	14,5 31,8 44,2 57,7 61,4
	– po upływie 24 godzin		
– po upływie 2 dni			
– po upływie 7 dni			
– po upływie 28 dni			
– po upływie 90 dni			
Ekspansja swobodna:			
– w wodzie, %		maks. 3,0	
– w powietrzu, %		maks. 1,0	
Samonapężenie, MPa		maks. 2,0	

TABELA 2

**Właściwości cementu bezskurczowego**

	Właściwość	Metoda badania	Wynik badania	
Cement	Powierzchnia właściwa, cm <sup>2</sup> /g	PN-EN 196-6	5500	
Zaczyn	Właściwa ilość wody, %	PN-EN 196-3	18,5	
	Czas wiązania:	PN-EN 196-3	95	
	– początek po upływie, min			
	– koniec po upływie, min	125		
Stażność objętości, mm	PN-EN 196-3	0,0		
Zaprawa 1:3	Plastyczność zaprawy (rozplływ), mm	PN-EN 13454-2	188	
	w/c		0,33	
	Wytrzymałość zapraw na zginanie, MPa:	PN-EN 196-1	6,1	
	– po upływie 24 godzin			
	– po upływie 2 dni			7,4
	– po upływie 7 dni			9,1
	– po upływie 28 dni			11,5
	– po upływie 90 dni	12,2		
Wytrzymałość zapraw na ściskanie, MPa:	PN-EN 196-1	30,6		
– po upływie 24 godzin				
– po upływie 2 dni			50,4	
– po upływie 7 dni			67,6	
– po upływie 28 dni			83,0	
– po upływie 90 dni	86,8			

Do produkcji omawianych mieszanek stosowane są w Zakładzie Doświadczalnym OMMB różne rodzaje cementów. Podamy właściwości tych tworzyw wytwarzanych z dwóch rodzajów spoiw: CEM I 42,5 R oraz produkowany w Zakładzie Doświadczalnym Oddziału Mineralnych Materiałów Budowlanych Instytutu Szkła, Ceramiki, Materiałów Ogniotrwałych i Budowlanych w Krakowie specjalny cement z mieszanym regulatorem wiązania, oznaczony jako MPz-IV. Właściwości tych cementów podano w tabeli 3.

Z cementów tych wykonuje się suche mieszanki zapraw i betonów. Podamy przykładowo właściwości zapraw (tab. 4) sporządzonej z dwóch wybranych cementów zgodnie z normą EN 196-1.

Godną podkreślenia jest duża wytrzymałość zaprawy uzyskanej z cementu MPz, szczególnie po 1 i 2 dniach. Także wysoka wytrzymałość po 28 dniach ma bardzo duże znaczenie przy stosowaniu tego materiału. Pomiary porowatości metodą BET wykazały małą porowatość tych obu zapraw, a dużą zawartość małych porów w zakresie od 10 do 50 nm. Jednak porowatość zaprawy wytwarzanej z cementu MPz jest wyraźnie mniejsza, szczególnie mniejszy jest udział porów większych od 50 nm. Dobra przyczepność zaprawy do betonu (tab. 3) zapewnia dobrą trwałość naprawianego materiału. Natomiast niska porowatość tej zaprawy i bardzo

mały efektywny współczynnik dyfuzji są czynnikami, które zwiększają odporność na korozyjne środowisko i trwałość materiału.

Pokazano także właściwości betonów, które można produkować z tych dwóch cementów (tab. 3). Skład mieszanek podano w tabeli 4.

TABELA 3

**Właściwości cementów**

Właściwość	CEM I 42.5 R	MPz-IV
Powierzchnia właściwa, cm <sup>2</sup> /g	3300	6100
Ciepło hydratacji według EN 196-9, J/g, po dniach:		
– 1	249,5	211,4
– 1,5	290,5	282,1
– 2	314,0	300,7
– 3	335,0	312,0
– 7	354,4	324,0
Wодоżądność, %	25,5	19,6
Czas wiązania, początek, koniec, h <sup>min</sup>	3 <sup>25</sup> , 4 <sup>45</sup>	2 <sup>15</sup> , 3 <sup>35</sup>

TABELA 4

**Właściwości zapraw**

Właściwość	Zaprawa z CEM I 42.5 R mieszanka 1	Zaprawa z MPz-IV mieszanka 2
Wytrzymałość na zginanie, MPa, po dniach	12,8	1 – 5,6
	24,7	2 – 7,4
	77,0	7 – 10,8
	288,4	28 – 12,6
	908,6	90 – 13,0
Wytrzymałość na ściskanie, MPa, po dniach	1 – 12,2	1 – 34,2
	2 – 23,4	2 – 58,5
	7 – 43,5	7 – 81,9
	28 – 55,8	28 – 98,9
	90 – 60,2	90 – 106,8
Porowatość po dniach, cm <sup>3</sup> /g	2 – 0,048	2 – 0,060
	28 – 0,044	28 – 0,023
	90 – 0,040	90 – 0,020
Przyczepność do betonu, MPa*	1,2÷1,6	2,5÷3,5

Uwaga: \* zgodnie z EN 1542.

W celu zapewnienia odpowiedniej urabialności mieszanki betonowej 2 dodano do niej superplastyfikator w postaci kondensatu sulfonowanej melaminy.

TABELA 5  
**Skład mieszanek betonowych**

Składnik	Zawartość, kg/m <sup>3</sup>
Cement	460
Piasek 0/0,5	110
Piasek 0,5/1,0	230
Piasek 1,0/2,0	258
Kryzywo bazaltowe 2/8	368
Jak wyżej 8/16	874
Woda*	175

\* Zawartość wody w mieszance 1 wynosiła 115 kg.  
Do mieszanki dodano 17 kg superplastyfikatora.

Właściwości mieszanek podano w tabeli 6.

TABELA 6  
**Właściwości mieszanek**

Właściwość	Mieszanka 1 Cement CEM I 42,5R	Mieszanka 2 Cement MPz-IV
Konsystencja	Konsystencja (V-3); VeBe – 9,0 s	Konsystencja (V-3); VeBe – 9,5 s
w/c	0,38	0,25
Zawartość powietrza	2,2%	1,6%

Właściwości betonów podano w tabelach 7–9.

TABELA 7  
**Wytrzymałość na ściskanie betonów**

Beton	Wytrzymałość na ściskanie, MPa, po dniach				
	1	2	7	28	90
Beton 1 CEM I 42,5R	31,2	52,9	64,2	72,2	81,2
Beton 2 MPz-IV	74,0	88,9	98,2	108,5	120,8



TABELA 8  
Właściwości fizyczne betonu 1

Absorpcja, %	Głębokość wnikania wody pod ciśnieniem 1,2 MPa, mm	Odporność na mróz ubytek masy, %. Spadek wytrzymałości, %	Skurcz, % po dniach	
			28	90
2,54	142	Po 150 cyklach 0,15 0,80 Po 300 cyklach 4,30 30,60 Po 450 cyklach zniszczenie	0,018	0,026
		W soli odladzającej* 0,124 kg/m <sup>2</sup>		

TABELA 9  
Właściwości fizyczne betonu 2

Absorpcja, %	Głębokość wnikania wody pod ciśnieniem 1,2 MPa, mm	Odporność na mróz ubytek masy, %. Spadek wytrzymałości, %	Skurcz, % po dniach	
			28	90
1,06	3	po 150 cyklach <u>0,00</u> 0,00 po 300 cyklach <u>0,02</u> 0,06 po 450 cyklach <u>0,08</u> 0,30 po 600 cyklach <u>0,3</u> 1,20	0,010	0,016
		W soli odladzającej* 0,023 kg/m <sup>2</sup>		

Efektywny współczynnik dyfuzji oznaczono dla zaczynu i zaprawy z cementu MPz-IV. Wybrano metodę badawczą zastosowaną przez Goto [7]. Zmierzony efektywny współczynnik dyfuzji był bardzo mały, a uzyskane wyniki zebrano w tabeli 10.

TABELA 10  
Efektywny współczynnik dyfuzji zaczynu i zaprawy z cementu MPz-IV

	Okres pomiarowy, dni			
	0–30	30–60	60–90	90–120
	m <sup>2</sup> /s × 10 <sup>-12</sup>			
Zaczyn	0,9	0,4	0,2	0,08
Zaprawa	1,1	0,8	0,5	0,1

\* Zgodnie z EN ISO 2736/2.

## 4. Podsumowanie

Wytwarzane w Oddziale Mineralnych Materiałów Budowlanych Instytutu Szkła, Ceramiki, Materiałów Ogniotrwałych i Budowlanych w Krakowie specjalne cementy i gotowe suche mieszanki zapraw i betonów pozwalają na rozwiązanie szeregu trudnych problemów występujących w budownictwie podziemnym. Cementy ekspansywne zabezpieczają duże elementy betonowe przed powstawaniem rys, które obniżają odporność betonu na korozję, gdyż stają się drogami szybkiej migracji roztworów agresywnych. Wytwarzane cementy ekspansywne mogą posiadać matrycę złożoną z odpornych na korozję spoiw, na przykład CEM III.

Natomiast pokazane właściwości cementu MPz wykazują, że ma on bardzo wysokie wytrzymałości, a wytwarzany z niego beton można sklasyfikować jako BWW. Beton ten wyróżnia się bardzo dużą odpornością na działanie mrozu. Równocześnie wykazuje on bardzo małą porowatość i korzystną strukturę porów. Ponadto bardzo mały efektywny współczynnik dyfuzji jonów chlorkowych stanowi dowód, że beton z cementu MPz będzie wyróżniał się dużą odpornością na korozję chlorkową. Ponieważ jony siarczanowe mają znacznie niższy współczynnik dyfuzji od jonów chlorkowych, przede wszystkim ze względu na większe rozmiary, beton z cementu MPz będzie także wykazywał dużą odporność na korozję siarczanową.

Bardzo dobre właściwości specjalnych zapraw i betonów opartych na cementach MPz stwarzają możliwości ich zróżnicowanych zastosowań. Zaprawy są predestynowane specjalnie do wykonywania napraw uszkodzonych konstrukcji betonowych, w tym szczególnie podpór, filarów i przęseł oraz mocowanie kotew. Inny obszar zastosowań stanowią fundamenty pod ciężkie maszyny, i ciężkie konstrukcje stalowe. Dalsze dziedziny zastosowań, to wypełnianie ubytków w pojemnikach i zbiornikach, naprawa kominów i chłodni kominowych. Bardzo dobrą markę uzyskały te kompozyty także w zakresie napraw pasów startowych na lotniskach oraz wykonywania posadzek w halach fabrycznych, w których występuje ruch ciężkich pojazdów.

Bardzo szybki przyrost wytrzymałości betonów z cementów serii MPz predestynuje je do wykonywania robót, których celem jest szybkie posadowienie maszyny na fundamentciei oddanie jej do eksploatacji, lub szybkie włączenie do ruchu wykonywanej inwestycji.

### LITERATURA

- [1] *Kurdowski W.*: Chemia cementu. PWN, Warszawa, 1991
- [2] *Król M., Tur W.*: Beton ekspansywny. Arkady, Warszawa, 1999
- [3] *Kurdowski W.*: Chemia materiałów budowlanych. AGH, Kraków, 2003
- [4] *Glasser F.*: The pore fluid in Portland cement, 11th ICCI, Vol. 1, Durban, 2003, p.19
- [5] *Vernet C.*: La Durabilite des Betons. Ponts et Chaussees, Paryż, 1992, s. 129
- [6] *Kurdowski W., Duszak S., Trybalska B.*: On the mechanism of cement paste corrosion in strong chloride solutions, Proc. Of Intern. Colloq., Mogilany, 1994, Ed. W. Kurdowski, Kraków, December 1994
- [7] *Goto S., Daimon M.*: Ion diffusion in cement paste, 8th ICCI Rio de Janeiro, vol. VI, Rio de Janeiro, 1986, p. 405