

Teresa Możaryn*

Aleksander Lamenta**

PROGNOZOWANIE ZMIAN WYBRANYCH WŁAŚCIWOŚCI UŻYTKOWYCH ZAPRAW DO NAPRAWIANIA KONSTRUKCJI ŻELBETOWYCH

W artykule przedstawiono wyniki badań trzech zapraw przeznaczonych do wykonywania napraw otuliny zbrojenia w konstrukcjach żelbetowych. Określono wpływ warunków atmosferycznych, symulowanych w laboratoryjnych badaniach starzeniowych, na właściwości utwardzonych zapraw, istotne dla trwałości otuliny zbrojenia: odporność na karbonatyzację, wytrzymałość i nasiąkliwość. Oceniono wyniki uzyskanych badań w aspekcie trwałości naprawy otuliny zbrojenia.

1. Wprowadzenie

Trwałość obiektów budowlanych jest związana z pojęciem okresu ich użytkowania. Wymagana trwałość konstrukcji betonowych zostaje zachowana, jeżeli w założonym czasie użytkowania konstrukcja spełnia swoje funkcje z uwagi na użytkowanie, nośność i stateczność, bez wyraźnego obniżenia właściwości albo wystąpienia nieprzewidzianych kosztów utrzymania [1–3].

Zaprojektowanie, wykonanie i utrzymanie obiektu budowlanego o wymaganej trwałości pociąga za sobą konieczność określania trwałości wyrobów, z których obiekt będzie wykonany, oraz wykorzystywanych podczas jego użytkowania. W zakresie związanym z użytkowaniem obiektu zasadniczą rolę odgrywają zaprawy przeznaczone do napraw i ochrony konstrukcji żelbetowych. Ze względu na prawidłowe projektowanie napraw, z uwzględnieniem trwałości naprawianego obiektu żelbetowego, istotne jest posiadanie informacji o zachowaniu się podczas eksploatacji obiektu zapraw przeznaczonych do jego naprawy. Dotyczy to zwłaszcza utrzymania wymaganego poziomu właściwości ochronnych naprawianej otuliny zbrojenia podczas użytkowania, pomimo degradującego działania otaczającego środowiska. Możliwości techniczne pozwalają modelować zwią-

* dr inż – adiunkt w Zakładzie Trwałości i Ochrony Budowli ITB

** mgr inż. – w Zakładzie jw.

zane bezpośrednio z trwałością zjawiska degradacji i podatności wyrobów i obiektów na niszczące działanie występujących czynników, niezależnie lub równocześnie, podczas użytkowania konstrukcji [4, 5]. Z uwagi na trwałość obiektów żelbetowych istotne jest uzupełnienie charakterystyk technicznych zapraw przeznaczonych do naprawy otuliny zbrojenia o dane techniczne dotyczące utrzymania wymaganego poziomu właściwości ochronnych w zdefiniowanych warunkach użytkowania.

W środowisku atmosferycznym niszczenie konstrukcji żelbetowych następuje najczęściej w wyniku korozji zbrojenia. Główną przyczyną jej rozwoju są: zubożenie betonowej otuliny zbrojenia w wyniku karbonatyzacji, korozja mrozowa i korozja spowodowana chlorkami. Badania wytrzymałości, mrozoodporności i odporności na karbonatyzację wyrobów zawierających cement, a więc zdecydowanej większości wyrobów przeznaczonych do napraw konstrukcji, są obecnie podstawowymi badaniami wymaganymi przez międzynarodowe normy i dokumenty normalizacyjne przy dopuszczeniu tych wyrobów do stosowania w budownictwie [6–8]. Badania takie mogą również stanowić podstawę do określania przewidywanego okresu użytkowania, a więc trwałości, wyrobów stosowanych do wykonania i utrzymania obiektów budowlanych.

W Zakładzie Trwałości i Ochrony Budowli ITB przeprowadzono przyspieszone badania laboratoryjne, podczas których określano wpływ warunków ekspozycji cieplno-wilgotnościowych na wybrane właściwości użytkowe stosowanych w praktyce zapraw, przeznaczonych do naprawy obiektów żelbetowych. Badania przeprowadzono w celu opracowania laboratoryjnej procedury przewidywania zachowania przez te wyroby – w warunkach użytkowania – wymaganych właściwości użytkowych.

2. Podstawy wyboru właściwości użytkowych w badaniach przyspieszonych

Korozja betonu, zbrojenia lub obydwu procesów jednocześnie przyczynia się do degradacji konstrukcji żelbetowych. Proces korozji zbrojenia prowadzi do pęknięcia otuliny.

Korozję zbrojenia poprzedzają – powodowane wpływami otaczającego środowiska – przemiany w betonie otuliny. Obniżenie lub utrata właściwości ochronnych betonowej otuliny względem zbrojenia wynika przede wszystkim:

- ze zubożenia betonowej otuliny w wyniku procesu karbonatyzacji,
- z przeniknięcia do betonu z otaczającego środowiska substancji agresywnych w stosunku do stali zbrojeniowej (np. jonów chlorkowych),
- z korozji betonu otuliny.

Z przyczyn ekonomicznych nie powinno się doprowadzać do znaczącej korozji zbrojenia. W praktyce jednak należy się liczyć z okresowymi naprawami i remontami konstrukcji żelbetowych. Stosowane wówczas betony i zaprawy naprawcze powinny się charakteryzować po stwardnieniu między innymi właściwościami zapewniającymi zbrojeniu odpowiednią ochronę przed korozją.

Właściwości ochronne betonowej otuliny zbrojenia wynikają z odpowiedniego doboru betonu i jego składników, technologii wykonania oraz pielęgnacji. Charakterystyki techniczne wprowadzanych do stosowania wyrobów i systemów przeznaczonych do napraw konstrukcji żelbetowych obejmują właściwości techniczne potwierdzające ich przydatność do konkret-

nych zastosowań. Nie dostarczają natomiast informacji, przez jaki czas w określonych, wpływających niszcząco warunkach środowiskowych wykonane naprawy umożliwią zachowanie odpowiedniego poziomu właściwości użytkowych. Podejmując próbę określenia zachowania się – podczas przyspieszonych badań laboratoryjnych – zapraw przeznaczonych do naprawy konstrukcji żelbetowych, wybrano do oceny ich przydatności właściwości użytkowe związane bezpośrednio z właściwościami ochronnymi otuliny zbrojenia:

- odporność na karbonatyzację (głębokość zubożenia, współczynnik dyfuzji CO₂ w zaprawie),
- nasiąkliwość,
- wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu,
- wytrzymałość na ściskanie.

3. Badania zmian właściwości użytkowych zapraw podczas przyspieszonej ekspozycji starzeniowej

Badano trzy zaprawy stosowane do napraw obiektów żelbetowych. Próbkę badawczą, wykonane zgodnie z kartami technicznymi wyrobów, po rozformowaniu sezonowano przez 28 dni w warunkach laboratoryjnych: $23 \pm 2^{\circ}\text{C}$, wilgotność względna powietrza $50 \pm 5\%$. Przygotowując próbki do badania nasiąkliwości i odporności na karbonatyzację, nie stosowano środków antyadhezyjnych. Przed rozpoczęciem badań próbki sezonowano przez 28 dni nad wodą i 7 dni w komorze klimatycznej (temperatura: $23 \pm 2^{\circ}\text{C}$, wilgotność względna powietrza $65 \pm 5\%$), bez dostępu dwutlenku węgla. Po tym terminie określono początkowe wartości właściwości użytkowych badanych zapraw, pozwalające określić ich przydatność do zastosowań deklarowanych przez producentów.

Wyniki wykonanych oznaczeń właściwości użytkowych (tablica 1) wskazywały na przydatność zaprawy do napraw konstrukcyjnych wykonywanych wewnątrz budynków i na zewnątrz obiektów. Zaprawy po 28 dniach twardnienia charakteryzowały się wytrzymałością na ściskanie ≥ 45 MPa, współczynnikiem sprężystości przy ścisaniu nie niższym niż 24 MPa oraz niskim skurczem. Ich przyczepność do betonu, oznaczona metodą odrywania, była wyższa niż 1,5 MPa. Zaprawy były odporne na karbonatyzację, o czym świadczyły wyznaczone dla każdej z badanych zapraw względne współczynniki wnikania dwutlenku węgla o wartości mniejszej od 1.

Próbki poddano przyspieszonej ekspozycji starzeniowej w warunkach ciepłno-wilgotnościowych, w której 1 cykl, trwający 48 h, obejmował:

- 5 h zamrażania w temperaturze $-20 \pm 1^{\circ}\text{C}$,
- 17 h sezonowania w temperaturze $23 \pm 2^{\circ}\text{C}$ i wilgotności względnej powietrza $50 \pm 5\%$,
- 3 h przechowywania w atmosferze nasyconej pary wodnej w temperaturze $23 \pm 2^{\circ}\text{C}$,
- 4 h przechowywania w temperaturze $40 \pm 2^{\circ}\text{C}$ i wilgotności względnej powietrza $50 \pm 5\%$,
- 17 h sezonowania w temperaturze $23 \pm 2^{\circ}\text{C}$ i wilgotności względnej powietrza $50 \pm 5\%$.

Kolejno, po 30, 60, 90, 120 i 160 dniach ekspozycji ciepłno-wilgotnościowej wycofywano serie próbek badawczych i po sezonowaniu ich przez 7 dni w warunkach laboratorium oznaczano współczynniki dyfuzji CO₂, wytrzymałości na ściskanie oraz rozciąganie przy zginaniu i nasiąkliwość. Wyniki tych oznaczeń przedstawiono w tablicach 2 i 3.

Badania nasiąkliwości, wytrzymałości na ściskanie i wytrzymałości na zginanie wykonano zgodnie z PN-85/B-04500 *Zaprawy budowlane. Badania cech fizycznych i wytrzymałościowych*.

Tablica 1. Charakterystyka techniczna zapraw naprawczych wytypowanych do badań przyspieszonych
Table 1. Technical characteristics of the repair mortars selected for accelerated tests

Właściwość	Wartość		
	zaprawa 1	zaprawa 2	zaprawa 3
Wytrzymałość na ściskanie po 28 dniach, MPa	62	51	45
Wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu po 28 dniach, MPa	4,9	5,4	13,0
Skurcz, %	0,005	0,08	1,2
Nasiąkliwość, %	6,1	8,7	1,5
Przyczepność do betonu, MPa	1,6	1,9	2,4
Mrozoodporność	odporna	odporna	odporna
Stan zbrojenia w zaprawie	pasywny	pasywny	pasywny
Zawartość jonów chlorkowych, %	0,02	0,004	0,008
Współczynnik liniowej rozszerzalności cieplnej po 28 dniach, 1/K	12×10^{-6}	15×10^{-6}	11×10^{-6}
Moduł sprężystości przy ściskaniu po 28 dniach, GPa	26	24	25
Grubość warstwy skarbonatyzowanej	0,25 mm/doba ^{0,5}	0,34 mm/doba ^{0,5}	0,77 mm/doba ^{0,5}
Względny współczynnik wnikania dwutlenku węgla*	0,24	0,31	0,7
* Względny współczynnik wnikania CO ₂ był ilorazem współczynnika dyfuzji CO ₂ w badanej zaprawie i współczynnika dyfuzji CO ₂ w zaprawie odniesienia o składzie: 1 część wagowa cementu portlandzkiego bez dodatków CEM I 32,5R, 3 części wagowe piasku do badania wytrzymałości cementu zgodnie z PN-EN 196-1:2006 oraz w/c 0,5.			

Współczynniki dyfuzji dwutlenku węgla oraz głębokość karbonatyzacji dla zapraw przed i podczas ekspozycji przyspieszonych wyznaczono zgodnie procedurą badawczą LO 31 „Wyznaczanie współczynnika wnikania dwutlenku węgla do betonów, zapraw i zaczynów z cementów klinkierowych”. Badanie polegało na wyznaczeniu – przy zastosowaniu jako wskaźnika barwnego wodno-alkoholowego roztworu fenoloftaleiny – grubości zobojętnionej warstwy z próbek zapraw badanych podczas ekspozycji w komorze do karbonatyzacji. W komorze utrzymywane było stężenie CO₂ $1 \pm 0,2\%$, stała wilgotność względna powietrza $65 \pm 5\%$ oraz stała temperatura $23 \pm 2^{\circ}\text{C}$. Badanie w komorze karbonatyzacyjnej prowadzono przez 42 dni. Z uzyskanych doświadczalnie wyników po-

miarów głębokości zubożenia wyznaczano współczynniki dyfuzji dwutlenku węgla w zaprawach.

Tablica 2. Wyniki oznaczeń nasiąkliwości i wytrzymałości zapraw naprawczych podczas przyspieszonej ekspozycji ciepło-wilgotnościowej starzeniowej

Table 2. Results of water absorption and strength of repair mortars during accelerated weathering

Okres przechowywania próbek w warunkach ekspozycji starzeniowej, doba	Zaprawa 1	Zaprawa 2	Zaprawa 3
Nasiąkliwość, %			
0	6,1	8,7	1,5
30	6,1	9,2	1,4
60	7,2	10,4	1,5
90	6,8	10,5	1,4
120	7,0	10,0	1,4
160	6,6	10,1	1,0
Wytrzymałość na ściskanie, MPa			
0	62	59	68
30	55	63	77
60	55	69	68
90	61	71	76
120	67	50	60
160	66	60	68
Wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu, MPa			
0	4,70	5,70	13,8
30	4,50	5,75	14,0
60	4,30	6,34	14,0
90	3,52	6,73	13,8
120	2,93	6,41	13,4
160	3,02	6,85	14,2

Badania karbonatyzacji próbek zapraw poddanych uprzednio przyspieszonej ciepło-wilgotnościowej ekspozycji starzeniowej wykazały, że zarówno głębokość zubożenia, jak i współczynniki dyfuzji zmieniały się (tablica 3). Przykładowo, próbki z zaprawy 1

po trwającej 30 dni ekspozycji starzeniowej, a następnie po 42 dniach przebywania w komorze karbonatyzacyjnej, uległy zubożeniu na głębokość 1,5 mm. Natomiast po 120 dniach ekspozycji starzeniowej głębokość zubożenia, po 42 dniach w komorze karbonatyzacyjnej, wyniosła 2,4 mm. W przypadku zaprawy odniesienia wartości te wynosiły odpowiednio 7,9 mm i 9,1 mm.

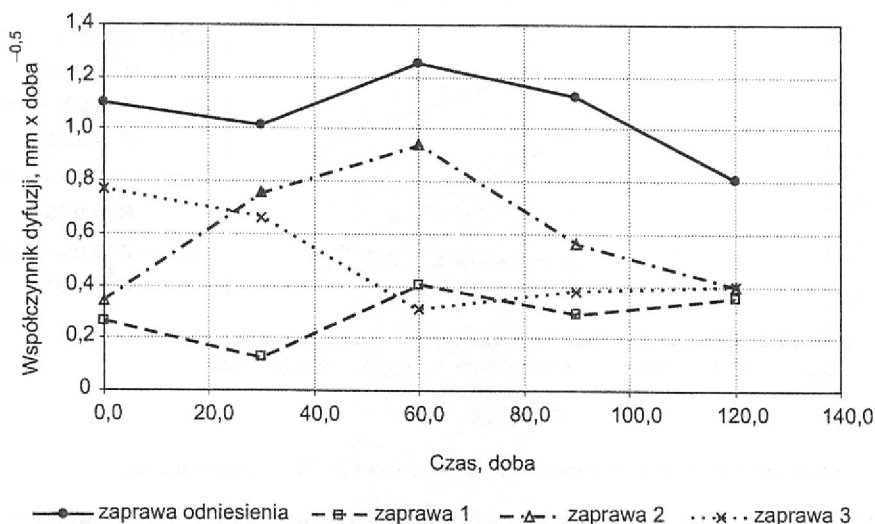
Tablica 3. Wyniki oznaczeń głębokości zubożenia i współczynników dyfuzji dwutlenku węgla w zaprawach badanych podczas przyspieszonej ciepłno-wilgotnościowej ekspozycji starzeniowej
Table 3. Results of carbonated layer thickness and carbon dioxide diffusion coefficients of tested mortars during accelerated weathering exposure

Czas ekspozycji starzeniowej	Zaprawa odniesienia	Zaprawa 1	Zaprawa 2	Zaprawa 3
0 dni	7,8	1,0	3,8	1,5
	1,103 mm/doba ^{0,5}	0,265 mm/doba ^{0,5}	0,341 mm/doba ^{0,5}	0,772 mm/doba ^{0,5}
30 dni 15 cykli	7,9 mm	1,5 mm	5,8 mm	2,5 mm
	1,016 mm/doba ^{0,5}	0,130 mm/doba ^{0,5}	0,760 mm/doba ^{0,5}	0,659 mm/doba ^{0,5}
60 dni 30 cykli	9,0 mm	1,7 mm	7,7 mm	3,4 mm
	1,253 mm/doba ^{0,5}	0,406 mm/doba ^{0,5}	0,940 mm/doba ^{0,5}	0,310 mm/doba ^{0,5}
90 dni 45 cykli	9,7 mm	2,8 mm	6,9 mm	3,0 mm
	1,124 mm/doba ^{0,5}	0,296 mm/doba ^{0,5}	0,560 mm/doba ^{0,5}	0,380 mm/doba ^{0,5}
120 dni 60 cykli	9,1 mm	2,4 mm	5,7 mm	3,5 mm
	0,810 mm/doba ^{0,5}	0,355 mm/doba ^{0,5}	0,400 mm/doba ^{0,5}	0,400 mm/doba ^{0,5}

W przypadku zaprawy 2 i zaprawy 3 również zaobserwowano podobny wpływ czasu trwania ekspozycji starzeniowej na głębokość zubożenia podczas trwającej 42 dni karbonatyzacji.

Współczynniki dyfuzji dwutlenku węgla w zaprawach również ulegały zmianie podczas przyspieszonej ekspozycji starzeniowej próbek badawczych (rys. 1).

Podczas przyspieszonej ekspozycji starzeniowej wartość współczynnika dyfuzji dwutlenku węgla w zaprawie odniesienia wzrastała od 1,103 mm/doba^{0,5} do 1,253 mm/doba^{0,5}, w przypadku próbek eksponowanych do 60 dni. Podczas dalszej ekspozycji zaobserwowano spadek wartości współczynnika dyfuzji CO₂ do wartości 0,81 mm/doba^{0,5} po 120 dniach ekspozycji starzeniowej. Podobne zachowanie się zaobserwowano w przypadku próbek z zaprawy 2 podczas 60 dni ekspozycji starzeniowej – współczynnik dyfuzji CO₂ wzrastał od 0,341 mm/doba^{0,5} do 0,940 mm/doba^{0,5}, a następnie – po 120 dniach ekspozycji starzeniowej – obniżał się do wartości 0,400 mm/doba^{0,5}.



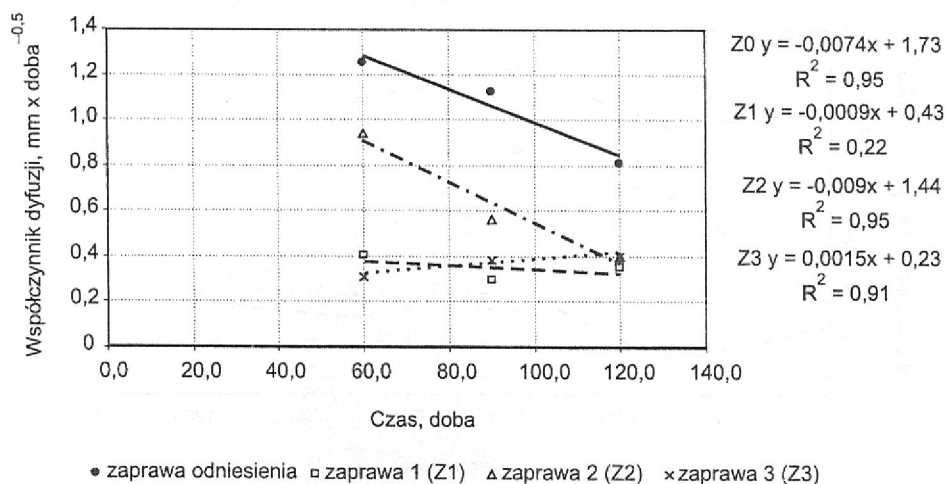
Rys. 1. Zmiany współczynników dyfuzji dwutlenku węgla w badanych zaprawach oraz w zaprawie odniesienia podczas przyspieszonej cieplno-wilgotnościowej ekspozycji starzeniowej

Fig. 1. Changes of carbon dioxide diffusion in tested mortars for repair of reinforced concrete structures and in coefficients of reference mortar during accelerated weathering exposure

W przypadku zaprawy 1 obniżenie wartości współczynnika dyfuzji CO_2 z $0,265 \text{ mm/doba}^{0,5}$ do $0,130 \text{ mm/doba}^{0,5}$ wystąpiło w próbkach poddanych ekspozycji starzeniowej przez 30 dni, a w próbkach ekspozycyjnych dłużej wartość ta była w granicach $0,406\text{--}0,355 \text{ mm/doba}^{0,5}$.

Wartości współczynnika dyfuzji CO_2 w próbkach z zaprawy 3 obniżyły się wyraźnie podczas 60 dni ekspozycji starzeniowej od $0,772 \text{ mm/doba}^{0,5}$ do $0,310 \text{ mm/doba}^{0,5}$, a w kolejnych cyklach zaobserwowano wzrost wartości współczynnika do $0,400 \text{ mm/doba}^{0,5}$.

Na wykresie (rys. 2) pokazano tendencję zmian współczynników dyfuzji dwutlenku węgla w badanych zaprawach oraz w zaprawie odniesienia po 60 dniach ekspozycji starzeniowej. Współczynniki R^2 w równaniach dla zaprawy odniesienia oraz zaprawy 2 i zaprawy 3 przekraczały 0,9, co świadczyło o dobrym dopasowaniu funkcji liniowej do opisu zmian. W warunkach ekspozycji zaprawa odniesienia i zaprawa 2 wykazały tendencję do doszczelniania się, a zaprawa 3 – do powolnego rozszczelniania. Zaprawa 1 w porównaniu z pozostałymi badanymi zaprawami w najmniejszym stopniu uległa karbonatyzacji (maksymalna głębokość zobojętnienia wynosiła 2,8 mm). Niska wartość współczynnika kierunkowego w wyznaczonym równaniu sugeruje, że podczas ekspozycji starzeniowej wyznaczana wartość współczynnika dyfuzji dwutlenku węgla praktycznie nie zmieniała się. Można stąd wnioskować, że warunki ekspozycji starzeniowej nie wywołały w zaprawie zmian wpływających na jej odporność na karbonatyzację. W tym przypadku korelacja była słaba. Ze względu na wysoką odporność zaprawy 1 na karbonatyzację czas ekspozycji starzeniowej powinien zostać wydłużony, aby uzyskać więcej wyników dotyczących grubości warstwy karbonizowanej.



Rys. 2. Tendencje zmian współczynników dyfuzji dwutlenku węgla w badanych zaprawach oraz w zaprawie odniesienia podczas przyspieszonej ciepno-wilgotnościowej ekspozycji starzeniowej
 Fig. 2. Tendencies of changes of carbon dioxide coefficients in tested mortars and in the reference mortar during accelerated weathering exposure

4. Podsumowanie

Przeprowadzone badania trzech zapraw przeznaczonych do naprawy konstrukcji betonowych oraz zaprawy odniesienia wykazały, że podczas 160-dniowej przyspieszonej ciepno-wilgotnościowej ekspozycji starzeniowej nie uległy wyraźnym zmianom ich właściwości wytrzymałościowe oraz nasiąkliwość.

Jednocześnie badania wykazały, że warunki ekspozycji, symulujące warunki atmosferyczne, wpłynęły na parametry dotyczące odporności zapraw na karbonatyzację. W czasie ekspozycji zmieniały się grubości warstwy skarbonatyzowanej oraz współczynniki dyfuzji CO₂ w próbkach zapraw. Podczas ekspozycji starzeniowej jednej zaprawy naprawczej oraz zaprawy odniesienia wykonanej z cementu portlandzkiego CEM I 32,5R stwierdzono wzrost, a następnie obniżenie wartości współczynnika dyfuzji CO₂. W kolejnej badanej zaprawie naprawczej w pierwszym etapie ekspozycji zaobserwowano obniżenie wartości współczynnika dyfuzji CO₂, a następnie jego powolny wzrost. Na jedną z badanych zapraw warunki ekspozycji nie wywarły praktycznie wpływu, co świadczyło o jej dobrej odporności na warunki ekspozycji starzeniowej, symulujące warunki atmosferyczne.

Opisane badania zapraw przeznaczonych do naprawy konstrukcji żelbetowych dostarczyły informacji przydatnych do określania trwałości wykonywanych nimi napraw. Za pomocą tego typu badań można określić tendencję zmian lub potwierdzić stabilność ważnego parametru otuliny zbrojenia, jakim jest odporność na karbonatyzację. Uzyskane w badaniach informacje są istotne przy ustalaniu zakresu stosowania zapraw naprawczych oraz doborze odpowiedniej ochrony powierzchniowej naprawianej konstrukcji żelbetowej.

Bibliografia

- [1] Trwałość budynków i okres użytkowania wyrobów budowlanych w ustaleniach technicznych zharmonizowanych z dyrektywą 89/106/EWG. Seria: Dokumenty Unii Europejskiej dotyczące budownictwa. ITB, Warszawa 2002
- [2] Ściślewski Z.: Trwałość konstrukcji żelbetowych. Prace naukowe ITB. Seria: Monografie, Warszawa 1995
- [3] PN-ISO 15686-1:2005 Budynki i budowle. Planowanie okresu użytkowania. Część 1: Zasady ogólne
- [4] Marchand J., Samson E., Maltais Y.: Predicting the performance of concrete structures exposed to chemically aggressive environment-field validation. *Materials and Structures*, Vol. 35, Dec. 2002
- [5] Bary B., Selier A.: Coupled moisture-carbon dioxide-calcium transfer model for carbonation of concrete, *Computation Modelling of Concrete Structures*. Swets & Zeitinger, Lisse, 2003
- [6] Czarnecki L., Emmons P.H.: Naprawa i ochrona konstrukcji betonowych. Polski Cement, Kraków, 2002
- [7] *Corrosion In reinforced concrete structures*. Edited by Hans Böhni, Woodhead Publishing Limited, Cambridge, England
- [8] Zalecenia Udzielania Aprobat Technicznych ITB ZUAT-15/VI.02/2004
- [9] PN-EN 1504-3:2006 Wyroby i systemy do ochrony i napraw konstrukcji betonowych. Definicje, wymagania, sterowanie jakością i ocena zgodności. Część 3: Naprawy konstrukcyjne i niekonstrukcyjne

TESTING AND ESTIMATION OF CHANGES IN SELECTED CHARACTERISTICS OF PRODUCTS FOR THE REPAIR OF REINFORCED CONCRETE STRUCTURES

Summary

In this paper the laboratory tests of three mortars for the repair of concrete structures were presented. Report contains description of changes in characteristics of tested products caused by accelerated weathering. During accelerated weathering the strength, water absorption and resistance to carbonation were determined. Results of tests were discussed.

Praca wpłynęła do Redakcji 13 VI 2007