

dr inż. Grzegorz Bajorek, prof. PRz¹⁾

ORCID: 0000-0001-5312-8866

mgr inż. Michał Drabczyk²⁾

ORCID: 0000-0002-8774-2650

mgr inż. Justyna Nowicka-Semen^{2)*)}

ORCID: 0000-0003-0777-1644

Znaczenie cementów niskoklinkierowych w kształtowaniu trwałości elementów żelbetowych

The importance of low-clinker cements in shaping the durability of reinforced concrete elements

DOI: 10.15199/33.2022.09.07

Streszczenie. Artykuł zawiera analizę możliwości stosowania cementów niskoklinkierowych CEM IV/B (V) 42,5N LH/NA oraz CEM V/A (S-V) 42,5N LH/HSR/NA w betonach odpornych na korozję spowodowaną karbonatyzacją i chlorkami nie pochodzącymi z wody morskiej (klasa ekspozycji XC4, XD1), wg PN-EN 206. Przedstawiono w nim wyniki badań przeprowadzonych zgodnie z aktualnymi normami, ich analizę oraz wnioski, które potwierdzają równoważne właściwości betonów z cementami niskoklinkierowymi z właściwościami betonów z cementem CEM II/B-V 42,5R HSR.

Słowa kluczowe: beton; trwałość; wytrzymałość na ściskanie; karbonatyzacja; migracja jonów chlorkowych; konstrukcja żelbetowa.

Abstract. The article involves an analysis of the possibility of using low-clinker cements CEM IV/B (V) 42.5N LH/NA and CEM V/A (S-V) 42.5N LH/HSR/NA in concrete resistant to corrosion caused by carbonation and chlorides other than from sea water (XC4, XD1), according to PN-EN 206. It presents the results of tests carried out in accordance with the current standards, analysis and conclusions that confirm the equivalent performance of concretes with low-clinker cements with the properties of concretes with cement CEM II/B-V 42.5R HSR.

Keywords: concrete; durability; compressive strength; carbonation; migration of chloride ions; reinforced concrete structure.

Wybór właściwego materiału konstrukcyjnego podyktowany jest przede wszystkim koniecznością osiągnięcia wyspecyfikowanych właściwości wytrzymałościowych i trwałościowych konstrukcji w wymaganym czasie. W przypadku betonu, będącego jednym z najpopularniejszych wyrobów budowlanych, dobór odpowiednich właściwości oraz składników, które umożliwią osiągnięcie stawianych wymagań, jest w sposób nadrzędny zdefiniowany w normach PN-EN 206+A2:2021-08 oraz PN-B-06265:2018-10. Dostosowanie do wymagań tych norm, odkąd beton stał się wyrobem budowlanym, jest obowiązkiem każdego producenta betonu towarowego.

Zapisy obu wymienionych dokumentów ograniczają zastosowanie niektórych typów cementów niskoklinkierowych w określonych klasach ekspozycji. Mimo to, obecne trendy społkowe zorientowane są na cementy niskoklinkierowe i dodatki mineralne m.in. ze względu na konieczność ograniczenia dotychczasowej emisji CO₂, a przede wszystkim wskaźnika klinkier/cement do poziomu 0,60 w 2050 r. [1].

W ostatnim czasie powstało wiele prac badawczych i opracowań tematycznych zarówno polskich [1 ÷ 3], jak i zagranicznych [4 ÷ 6], dotyczących wpływu zastosowania spoiw

niskoklinkierowych na trwałość konstrukcji betonowych oraz kierunków ich rozwoju. Celem wykonanych przez badaczy analiz była przede wszystkim ocena właściwości betonów z zastosowaniem cementów niskoemisyjnych i wytypowanie rozwiązań, które ostatecznie wpłynęłyby na zachowanie lub polepszenie właściwości użytkowych konstrukcji. Kontynuując ten trend, w artykule podjęto próbę oceny użyteczności cementów CEM IV/B (V) 42,5N LH/NA i CEM V/A (S-V) 42,5N LH/HSR/NA w klasach ekspozycji XC4 i XD1.

Zaprezentowane wnioski wynikają bezpośrednio z porównania wyników badań betonów testowych z wynikami betonu referencyjnego oraz z analizy statystycznej w ramach koncepcji równoważnych właściwości użytkowych [7]. Kombinacja wymienionych elementów przeprowadzonej oceny pozwoliła w sposób dokładny wskazać, iż analizowane betony charakteryzują się porównywalną odpornością na niszczące działanie środowiska w porównaniu z betonem referencyjnym. Biorąc pod uwagę fakt, iż PN-EN 206 [7] umożliwia stosowanie cementów dzięki wykorzystaniu koncepcji równoważnych właściwości użytkowych, można udowodnić słuszność ich użycia tam, gdzie zgodnie z tablicą F. 2 [8] nie jest to dopuszczone, a także w sytuacji, gdy ocena bezpośrednich wyników jest niepewna. Następnym takim podejściem jest niewątpliwie wiele korzyści dla producentów betonu towarowego, takich jak ograniczenie śladu węglowego (emisji CO₂), a tym samym troska o środowisko, a także ujednoczenie produkcji pod kątem rodzaju stosowanego cementu oraz ograniczenie kosztów produkcji.

¹⁾ Politechnika Rzeszowska; Centrum Technologiczne Budownictwa Instytut Badań i Certyfikacji

²⁾ Lafarge Cement S.A.

^{*)} Adres do korespondencji: justyna.nowicka@lafarge.com

Charakterystyka badań i analizowanych cementów

Celem przeprowadzonych badań była analiza trwałości betonów wykonanych z użyciem cementów niskoklinkierowych CEM IV/B (V) 42,5N LH/NA oraz CEM V/A (S-V) 42,5N LH/HSR/NA i porównanie uzyskanych wyników z właściwościami betonu referencyjnego z cementem CEM II/B-V 42,5R HSR, który zgodnie z normą PN-B-06265 [8] tabela F.2 jest dopuszczony do stosowania w klasie ekspozycji XC i XD. Zastosowane cementy charakteryzują się (zgodnie z PN-EN 197-1:2012 [9]) zmniejszoną zawartością klinkieru do 45 – 64% w przypadku CEM IV/B (V) oraz do 40 – 64% w przypadku CEM V/A, a także zwiększoną zawartością składników głównych, takich jak popiół lotny krzemionkowy (V) i/lub granulowany żużel wielkopieczowy (S). Aby właściwie oznaczyć ich właściwości wpływające na trwałość, przeprowadzono analizę:

- **odporności mechanicznej**, wykonując badanie wytrzymałości na ściskanie wg normy PN-EN 12390-3:2019-7 [10];
- **odporności na korozję spowodowaną karbonatyzacją (XC)**, wykonując badanie odporności na karbonatyzację metodą przyspieszoną wg normy PN-EN 12390-12:2020-06 [11];
- **odporności na korozję spowodowaną chlorkami nie pochodzącymi z wody morskiej (XD)**, wykonując oznaczenie współczynnika migracji jonów chlorkowych wg normy PN-EN 12390-18 [12].

Na podstawie wyników badania wytrzymałości na ściskanie dokonano oceny betonu w odniesieniu do projektowanej klasy wytrzymałości, stosując kryteria akceptacji badań wstępnych wg załącznika A normy PN-EN 206 [7]. W odniesieniu do głębokości karbonatyzacji oraz współczynnika migracji jonów chlorkowych przeprowadzono analizę statystyczną w ramach koncepcji równoważnych właściwości użytkowych, dzięki czemu oznaczono wpływ zmniejszonej ilości klinkieru i zwiększonej ilości nieklinkierowych składników głównych w cemencie na szczelność betonu.

Trwałość betonów z cementami niskoklinkierowymi

Trwałość betonu wbudowanego w konstrukcję można z powodzeniem utożsamić z zachowaniem właściwości użytkowych całej konstrukcji w projektowanym czasie użytkowania. O utracie trwałości konstrukcji żelbetonowych mówi się, gdy zidentyfikowane zostanie zagrożenie korozją zbrojenia, a więc kiedy wysokoalkaliczny odczyn betonu, zapewniający ochronę zbrojenia, będzie zubożony przez proces karbonatyzacji postępujący w głąb konstrukcji. W momencie obniżenia pH betonu poniżej 11,8 ochronna warstwa pasywacyjna stali staje się nietrwała, co stwarza wysokie ryzyko rozwoju jej korozji. Dodatkowo obecność jonów chlorkowych przyspiesza ten proces oraz, w zależności od ich stężenia, powoduje jego rozpoczęcie często przy pH większym niż 11,8. Zagrożenie to wymusza na producentach cementu, domieszkach chemicznych i samego betonu poszukiwanie rozwiązań, które wzmocnią odporność betonu na wnikanie CO₂ i jonów chlorkowych. Częstym rozwiązaniem jest wzbogacanie betonu o dodatki typu II, które zwiększają jego szczelność.

W omawianym projekcie badawczym mieszanki były zaprojektowane zgodnie z wymaganiami dotyczącymi składu przy kombinacji klas ekspozycji XC4 i XD1. Każda z nich wykonana została przy stałym udziale poszczególnych frakcji kruszyw oraz stałej zawartości cementu i niezmiennym wskaźniku wodno-cementowym w poszczególnych klasach ekspozycji.

W tabeli 1 przedstawiono wyniki badań mieszanek betonowych. Badane mieszanki mieściły się w założonym zakresie klas konsystencji S3 i S4, a zawartość powietrza była mniejsza niż 3,5%.

Tabela 1. Właściwości badanych mieszanek betonowych
Table 1. Properties of tested concrete mixtures

Charakterystyka	Mieszanka referencyjna	Mieszanki testowe	
Rodzaj cementu	CEM II/B-V 42,5 R HSR	CEM IV/B(V) 42,5 N LH/NA	CEM V/A(S-V) 42,5N LH/HSR/NA
Oznaczenie betonu – klasy ekspozycji	R2 – XC4, XD1	TD1 – XC4, XD1	TD2 – XC4, XD1
Konsystencja – opad stożka [mm] po czasie 10 min	150	170	155
Zawartość powietrza [%]	2,0	1,8	2,4

Wyniki badania wytrzymałości na ściskanie. Oznaczenie wytrzymałości na ściskanie wykonano na próbkach dojrzewających 28 i 56 dni w wodzie w temperaturze 20±2°C. Uzyskane wyniki przedstawiono w tabeli 2. Jako kryterium akceptacji wymaganej klasy wytrzymałości betonu przyjęto osiągnięcie wartości $f_{ck} + 6$ MPa, jak w przypadku badań wstępnych (zał. A normy PN-EN 206 [7]). Zgodnie z tym stwierdzono, iż beton referencyjny osiągnął wyspecyfikowaną klasę wytrzymałości po 28 dniach dojrzewania, natomiast spośród betonów testowych, rozwiązania z cementem CEM IV (TD1) i cementem CEM V (TD2) spełniły zakładane kryterium dotyczące klasy wytrzymałości C30/37 po 56 dniach dojrzewania betonu, a to oznacza konieczność ustalenia w ich przypadku terminu oceny i deklarowania zgodności po 56 dniach dojrzewania.

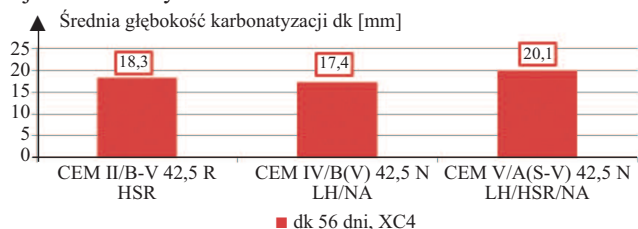
Tabela 2. Wyniki wytrzymałości na ściskanie analizowanych betonów

Table 2. Result of the compressive strength of the analyzed concretes

Charakterystyka	Mieszanka referencyjna	Mieszanki testowe	
Rodzaj cementu	CEM II/B-V 42,5 R HSR	CEM IV/B(V) 42,5 N LH/NA	CEM V/A(S-V) 42,5N LH/HSR/NA
Oznaczenie betonu – klasy ekspozycji	R2 – XC4, XD1	TD1 – XC4, XD1	TD2 – XC4, XD1
Wymagana minimalna klasa wytrzymałości na ściskanie	C30/37	C30/37	C30/37
Średnia wytrzymałość na ściskanie – 28 dni [MPa]	43,0	38,2	39,7
Średnia wytrzymałość na ściskanie – 56 dni [MPa]	52,5	45,2	48,7

Wyniki badań karbonatyzacji. Badanie karbonatyzacji rozpoczęto po 56 dniach dojrzewania betonu w wodzie w temperaturze 20 ±2°C i po 14 dniach kondycjonowania w warunkach laboratoryjnych, powietrzno-suchych, zgodnie z normą badawczą [11]. Ocena porównawcza trwałości ana-

lizowanych betonów uwzględniała średnią głębokość czoła karbonatyzacji (dk) uzyskaną po 70 dniach badania w komorze, w temperaturze $20 \pm 2^\circ\text{C}$, przy wilgotności względnej $57 \pm 3\%$ i stężeniu CO_2 równym $3,0 \pm 0,5\%$. Na rysunku 1 zestawiono wyniki z przeprowadzonego badania karbonatyzacji analizowanych betonów.



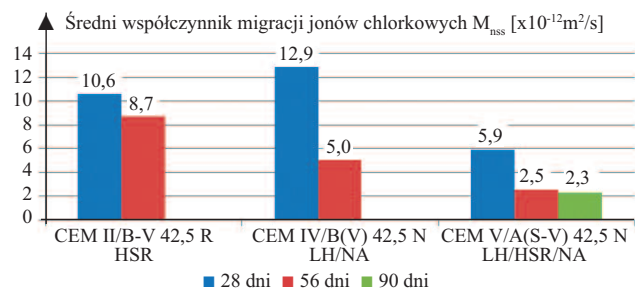
Rys. 1. Średnia głębokość karbonatyzacji dk [mm] w badanych betonach, oznaczona po 56 dniach dojrzewania w przypadku klasy ekspozycji XC4

Fig. 1. The average depth of carbonation dk [mm] in the tested concretes, determined after 56 days for the exposure class XC4

W przypadku betonu z CEM IV/B (V) 42,5N LH/NA używano mniejszą głębokość karbonatyzacji w porównaniu z betonem referencyjnym oraz betonem z CEM V/A (S-V). Czoło karbonatyzacji betonów z CEM V/A (S-V) miało największy zasięg, ale różnica głębokości w stosunku do betonu referencyjnego wyniosła tylko 1,8 mm. Można zatem stwierdzić, że zastosowanie cementów testowych CEM IV/B (V) oraz CEM V/A (S-V) nie wymusza zwiększenia otuliny zbrojenia w przyjmowanych klasach ekspozycji.

Wyniki badania migracji jonów chlorkowych. Badanie niestacjonarnej migracji jonów chlorkowych wykonano w przypadku dojrzewania w wodzie: wszystkich analizowanych składów po 28 i 56 dniach oraz betonu z CEM V/A po 90 dniach. Do badania wykorzystano po 3 próbki walcowe, dostosowane do wymiarów $d = 100 \text{ mm}$ i $h = 50 \pm 2 \text{ mm}$. Badanie trwało od 24 do 96 h, przy stałym napięciu 30 V. Ocena porównawcza trwałości analizowanych betonów uwzględniała średni współczynnik migracji jonów chlorkowych wyznaczony z uwzględnieniem średniej głębokości penetracji jonów chlorkowych, średniej temperatury obu roztworów testowych podczas badania, wartości przyłożonego napięcia, wysokości próbki i czasu trwania testu.

Na rysunku 2 przedstawiono wyniki przeprowadzonych badań. Dodatkowo wyznaczono wskaźnik AF (ageing factor) betonu z CEM V, który wskazuje, jaki wpływ na wielkość migracji jonów chlorkowych ma czas dojrzewania próbek.

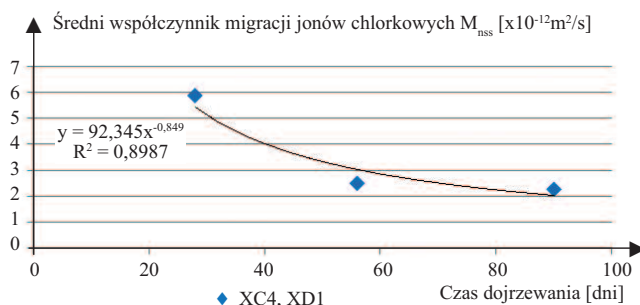


Rys. 2. Porównanie współczynników migracji jonów chlorkowych z analizowanych betonów w różnym czasie dojrzewania (28, 56 i 90 dni)

Fig. 2. Comparison of migration coefficients of chloride ions for the analyzed concretes at different ages (28, 56 and 90 days)

Wymiana cementu w stosunku 1 : 1 wpłynęła na zwiększenie szybkości migracji jonów chlorkowych w betonach z CEM IV i znaczne jej obniżenie w betonach z CEM V w porównaniu z betonem referencyjnym, w przypadku próbek dojrzewających 28 dni. Natomiast po 56 dniach dojrzewania widoczna jest tendencja zmniejszenia wartości współczynnika migracji jonów chlorkowych w betonach testowych. Oznacza to, że betony testowe wypadają zdecydowanie lepiej w porównaniu z betonem z CEM II. Wydłużenie okresu dojrzewania do 90 dni w przypadku betonów z CEM V wpłynęło na dalsze spowolnienie migracji jonów chlorkowych w głąb betonu (rysunek 2).

Wskaźnik AF, wyznaczony na podstawie wyników migracji jonów chlorkowych w czasie (rysunek 3), na poziomie 0,85 (wykładnik funkcji potęgowej), wskazuje na dużą zależność szczelności betonu, wyrażonej zdolnością do migracji jonów chlorkowych, od czasu dojrzewania betonu w wodzie.



Rys. 3. Wyznaczenie wskaźnika ageing factor (AF) betonu z cementem CEM V/A (S-V)

Fig. 3. Determination of the ageing factor (AF) for concrete with cement CEM V/A(S-V)

Ocena trwałości – analiza statystyczna. W celu precyzyjnej oceny wpływu cementów niskoklinkierowych na trwałość wykonano analizę statystyczną na podstawie zapisów raportu technicznego CEN/TR 16639 [13]. Za pomocą tego narzędzia porównano uzyskane właściwości betonów z cementami testowymi do betonu referencyjnego, uwzględniając w przypadku wybranej właściwości poza średnim wynikiem z n-próbek dodatkowo liczbę próbek poddanych badaniu (n), a także odchylenie standardowe uzyskanych wyników pojedynczych oraz wartości graniczne współczynnika T_j w odniesieniu do ocenianego aspektu trwałości (j), przyjęte z dokumentu CEN/TR 16639 [13].

Warunkiem uzyskania pozytywnej oceny porównawczej jest większa wartość wyliczonego T_j od wartości granicznych $T_j = 1,440$ ($n = 4$) dla głębokości karbonatyzacji i $T_j = 1,533$ ($n = 3$) dla współczynnika migracji jonów chlorkowych. Wyniki oceny statystycznej przedstawiono w tabelach 3 i 4.

Tabela 3. Ocena statystyczna równoważnych właściwości użytkowych w przypadku głębokości karbonatyzacji oznaczonej na betonach dojrzewających 56 dni

Table 3. Assessment of the equivalent concrete performance for the carbonation depth determined on concretes aged 56 days

Beton referencyjny	CEM II/B-V 42,5R HSR	T_j	Warunek	
Betony testowe	CEM IV/B(V) 42,5N LH/NA	4,757	$T_j > 1,440$	spełniony
	CEM V/A(S-V) 42,5N LH/HSR/NA	3,136		

Tabela 4. Ocena statystyczna równoważnych właściwości użytkowych w przypadku migracji jonów chlorkowych oznaczonej na betonach dojrzewających 28 i 56 dni

Table 4. Statistical evaluation of the equivalent concrete performance for the chloride ion migration determined on concretes aged 28 and 56 days

Beton referencyjny	CEM II/B-V 42,5R HSR	T _j (28 dni)	T _j (56 dni)	Warunek
Betony testowe	CEM IV/B(V) 42,5N LH/NA	1,616	10,279	T _j > 1,533 spełniony spełniony
	CEM V/A(S-V) 42,5N LH/HSR/NA	13,073	14,545	

Uzyskany efekt z przeprowadzonej oceny statystycznej jednoznacznie wskazuje, iż właściwości użytkowe betonów z CEM IV/B (V) i CEM V/A (S-V), determinujące ich trwałość, można uznać za równoważne z właściwościami betonu referencyjnego z CEM II/B-V.

Wnioski

Zaprezentowane wyniki badań wskazują, iż obniżona zawartość klinkieru w cementach CEM IV i CEM V umożliwia osiągnięcie granicznych wartości kryteriów trwałości, porównywalnych z właściwościami betonu referencyjnego. Wykonana analiza statystyczna potwierdza przydatność metody koncepcji równoważnych właściwości użytkowych do potwierdzania możliwości zastosowania receptur uwzględniających cementy niskoklinkierowe w składzie betonu. W wyniku analizy parametrów wpływających na trwałość betonu ustalono, że:

- zastosowanie cementu pucolanowego CEM IV, przy zastąpieniu cementu CEM II, pozwala osiągnąć klasę wytrzymałości betonu C30/37 po 56 dniach dojrzewania i wykazuje on najmniejszą karbonatyzację w porównaniu z pozostałymi betonami. W przypadku współczynnika migracji jonów chlorkowych, mimo iż uzyskany wynik przekracza poziom betonu referencyjnego, to zgodnie z wykonaną oceną statystyczną odporność na wnikanie chlorków jest równoważna wobec betonu z cementem portlandzkim popiołowym CEM II;

- beton wykonany z cementu wieloskładnikowego CEM V zamiast popiołowego cementu portlandzkiego CEM II osiągnął wymaganą klasę wytrzymałości C30/37 po 56 dniach dojrzewania betonu i w większym stopniu niż pozostałe betony uległ karbonatyzacji, ale przy największej odporności na wnikanie jonów chlorkowych. W przypadku CEM V analiza statystyczna wykazała, że mimo większej głębokości karbonatyzacji betonu o 1,8 mm, właściwość ta jest równoważna z odpornością na wnikanie CO₂ reprezentowaną przez beton referencyjny;

- wskaźnik AF (ageing factor) betonu z cementu wieloskładnikowego CEM V oznaczony na podstawie uzyskanych wyników współczynnika migracji jednoznacznie wskazuje na dużą zależność szybkości wnikania jonów chlorkowych od czasu dojrzewania próbek, co potwierdza również spadek współczynnika migracji chlorków M_{nss} wraz z wydłużonym okresem sezonowania próbek w wodzie;

- w sytuacji, gdy zawartość cementu i wskaźnik w/c są stałe, odporność betonów na karbonatyzację i wnikanie jonów chlorkowych będzie w głównej mierze zależna nie tylko

od ilości wodorotlenku wapnia zdolnego do wiązania dwutlenku węgla, ilości i rodzaju dodatku/ów w składzie cementu, ale również od właściwości mieszanki betonowej, a przede wszystkim jej napowietżenia i charakterystyki rozkładu porów kapilarnych w stwardniałym betonie decydujących o łatwości transportu agresywnych mediów;

- zastosowanie cementów niskoklinkierowych w betonach spełniających wymagania klas ekspozycji XC i XD jest możliwe, co wykazały przeprowadzone badania. Obszarem do dalszych prac jest dostosowanie rozwoju wytrzymałości tych betonów do dojrzewania w warunkach obniżonej temperatury, gdyż w normowych warunkach wymagana klasa wytrzymałości C30/37 osiągnięta została dopiero po 56 dniach;

- zamiana cementu portlandzkiego popiołowego CEM II na omawiane cementy niskoklinkierowe w stosunku 1 : 1 pozwala zmniejszyć wskaźnik klinkierowy CF, a tym samym emisję CO₂ o ok. 17% w przypadku CEM IV i o ok. 24% w przypadku CEM V;

- przy zastosowaniu cementu pucolanowego CEM IV/B (V) 42,5 N LH/NA w klasach ekspozycji XC4 oraz XD1 należy pamiętać podczas kontroli produkcji, aby zapewnić uzyskanie wymaganego składu betonu w odniesieniu do ilości i jakości cementu, wskaźnika w/c oraz zawartości powietrza.

Literatura

- [1] Środa B. Cementy niskoklinkierowe – terazniejszość i skomplikowana przyszłość. Budownictwo Technologie Architektura. 2022 (1).
- [2] Górak P, Gaudy J, Wójcik A, Grądzki A. Zmniejszenie śladu węglowego w konstrukcjach mostowych za pomocą rozwiązań materiałowych dla betonów opartych na cementach niskoklinkierowych. Dni Betonu 2021.
- [3] Grzmil W, Raczkiewicz W. Ocena wpływu rodzaju cementu na proces karbonatyzacji betonu i korozji zbrojenia w próbkach żelbetowych. Cement, Wapno, Beton. 2017; R-22/84 4: 311 – 319.
- [4] Elsalamawy M, Mohamed AR, Kamal EM. The role of relative humidity and cement type on carbonation resistance of concrete. Alexandria Engineering Journal. 2019; V. 58 I. 4: 1257 – 1264.
- [5] Otieno M, Ikotun J, Ballim Y. Experimental investigations on the effect of concrete quality, exposure conditions and duration of initial moist curing on carbonation rate in concretes exposed to urban, inland environment. Construction and Building Materials. 2020: 246.
- [6] Bouteiller V, Ceremona Ch, Baroghel-Bouny V, Maloula A. Corrosion initiation of reinforced concretes based on Portland or GGBS cements: Chloride contents and electrochemical characterizations versus time. Cement and Concrete Research. 2012; V. 42 I. 11.
- [7] PN-EN 206+A1:2016-12: Beton – Wymagania, właściwości, produkcja i zgodność.
- [8] PN-B-06265:2018-10 Beton – Wymagania, właściwości, produkcja i zgodność. Krajowe uzupełnienie PN-EN 206+A1:2016-12.
- [9] PN-EN 197-1:2012 Cement – Część 1: Skład, wymagania i kryteria zgodności dotyczące cementów powszechnego użytku.
- [10] PN-EN 12390-3:2019-07 Badania betonu – Część 3: Wytrzymałość na ściskanie próbek do badań.
- [11] PN-EN 12390-12:2020-06 Badania betonu. Część 12: Oznaczenie odporności betonu na karbonatyzację. Przyspieszona metoda karbonatyzacji.
- [12] PN-EN 12390-18:2021-08 Badania betonu. Część 18: Oznaczenie współczynnika migracji chlorków.
- [13] CEN/TR 16639:2014E. Use of k-value concept, equivalent concrete performance concept and equivalent performance of combinations concept. CEN, marzec 2014.

Przyjęto do druku: 23.08.2022 r.