

mgr inż. Piotr Górak<sup>1\*)</sup>  
 ORCID: 0000-0003-3479-7647  
 mgr inż. Bartosz Rewera<sup>1)</sup>

# Beton nawierzchniowy z eksponowanym kruszywem fotoluminescencyjnym

## Road concrete with exposed photoluminescent aggregates

DOI: 10.15199/33.2019.09.04

**Streszczenie.** W artykule przedstawiono wyniki badań laboratoryjnych i polowych betonu nawierzchniowego z eksponowanym kruszywem fotoluminescencyjnym. Zakres przeprowadzonego programu badawczego obejmował selekcję i dobór kruszywa o odpowiednich parametrach „zimnego świecenia”, wybór dezaktywatora powierzchni pozwalającego na optymalne wyeksponowanie kruszywa oraz wykonanie projektu trwałej i odpowiednio wybarwionej matrycy kompozytu betonowego. Po etapie badań laboratoryjnych wykonano próbny odcinek nawierzchni betonowej z eksponowanym kruszywem, który poddano długookresowej obserwacji, badaniu wytrzymałości mechanicznej i trwałości. „Świecący beton” pozwala na zapewnienie bezpieczeństwa przez zwiększenie widoczności traktu bez konieczności oświetlenia go. Z punktu widzenia ekologii oraz architektury krajobrazu niezanieczyszczonej sztucznym światłem może to być przyszłościowe rozwiązanie. Przeprowadzone badania i uzyskane wyniki potwierdziły trwałość nawierzchni ze „świecącego betonu” eksploatowanej w polskich warunkach klimatycznych.

**Słowa kluczowe:** beton; nawierzchnia betonowa; kruszywo fotoluminescencyjne; trwałość; kruszywo eksponowane.

**Abstract.** The article presents the results of laboratory and field tests of road concrete with exposed photoluminescent aggregate. The scope of the research program included selection of aggregates with appropriate parameters of "cold light", selection of surface deactivator allowing optimal exposure of the aggregate. After the laboratory tests, a test section of the road concrete with exposed aggregate was made, subjected to a long-term observation and for which mechanical strength and durability tests were carried out. "Shining concrete" allows you to ensure safety by increasing the visibility of the road without having to provide lighting. From the point of view of ecology and landscape architecture not contaminated with artificial light, it can be a future-proof solution for this type of application. The tests carried out and the results obtained confirmed the durability of this type of surface exploited in our climatic conditions.

**Keywords:** concrete; pavement; photoluminescent aggregate; durability; aggregate exposed.

**B**etonowe autostrady i drogi ekspresowe są obecnie wykonywane w systemie dwuwarstwowym, gdzie górna warstwa nawierzchni (GWN) ma makroteksturę w postaci odkrytego kruszywa. Coraz bardziej popularne są betonowe nawierzchnie dekoracyjne z eksponowanym kruszywem osadzonym w barwionej masie betonowej, dobierane przez projektantów w taki sposób, aby harmonijnie komponowały się z otoczeniem. Liczba możliwych barw i stopnia ekspozycji kruszywa pozwala na różne kierunki zastosowania takiego materiału. Do odsłoniętej warstwy ścieralnej nawierzchni można też zastosować kruszywo fotoluminescencyjne. Na świecie pojawiło się już kilka realizacji ciągów komunikacyjnych, w przypadku których wykorzystano inkluzję luminoforów. W polskich warunkach klima-

tycznych zastosowanie tego typu betonu nawierzchniowego wiąże się z koniecznością potwierdzenia trwałości rozwiązania w środowisku narażonym na zamrażanie i rozmrażanie w obecności soli odladzających.

**Fotoluminescencja** to odmiana luminescencji, w której czynnikiem wzbudzającym świecenie jest energia świetlna. Ze względu na czas świecenia można wyróżnić **fluorescencję**, która zanika natychmiast, gdy nie będzie źródła wzbudzenia (iluminacji) i **fosforescencję**, która trwa przez dłuższy okres, a jej intensywność zanika powoli. To zjawisko fosforescencji wykorzystują luminofory stosowane jako eksponowane kruszywa dekoracyjne w betonach nawierzchniowych [1, 2, 11, 12].

### Materiały

Luminofory zastosowane w projekcie to substancje o właściwościach fosforescencyjnych, bezpieczne w użyciu, nietoksyczne i nieradioaktywne. Czas,

w którym mogą efektywnie funkcjonować bez utraty właściwości, to 20 – 30 lat. Istnieją trzy podstawowe kolory luminoforów: żółtozielony; niebieski i purpurowy, które różnią się intensywnością świecenia w czasie [4].

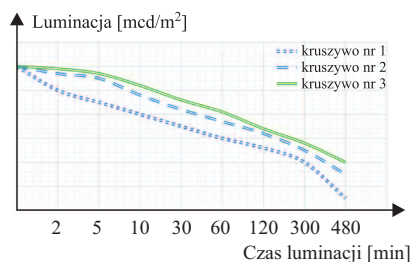
W pierwszej fazie projektu kluczowy był wybór odpowiedniej jakości kruszywa fotoluminescencyjnego charakteryzującego się m.in. odpowiednią długością i intensywnością luminacji, odpowiednim kształtem i uziarnieniem, właściwą przyczepnością do matrycy cementowej oraz odpornością na czynniki atmosferyczne. Dostępne na rynku kruszywa luminescencyjne różnią się strukturą ziarna (rdzenia) oraz technologią natrysku luminofora na rdzeń. W zależności od metody wytwarzania oraz rodzaju luminofora intensywność i długość świecenia jest różna.

Wstępna weryfikacja kruszywa polegała na porównaniu intensywności świecenia kruszyw w czasie na podstawie danych producentów zawartych w kartach

<sup>1)</sup> CEMEX Polska Sp. z o.o.

<sup>\*)</sup> Adres do korespondencji: piotr.gorak@cemex.com

technicznych i materiałach informacyjnych. Do dalszych badań wytypowano kruszywo 2 i 3 (rysunek) charakteryzujące się najdłuższym czasem luminaacji. Ze względu na walory estetyczne, czyli równomierność rozmieszczenia ziaren i ich zagęszczenie na jednostkę powierzchni, zastosowano kruszywo o uziarnieniu 4 (5) – 8 mm.



**Porównanie intensywności luminaacji różnych rodzajów kruszyw**  
Comparison of the intensity of illuminations of various types of aggregates

Recepturę matrycy betonowej zaprojektowano jako beton C30/37 XC4, XF4 wg zalecanych składów granicznych na cemencie o szybkim przyroście wytrzymałości CEM I 42,5 R oraz na kruszywie dolomitowym o  $d_{max} = 8$  mm pochodzenia dewońskiego, które charakteryzowało się bardzo dobrymi parametrami mechanicznymi i trwałością (tabela 1). Ciemny kolor skały pozwolił na uzyskanie odpowiedniego kontrastu inkluzji z kruszywem fotoluminescencyjnym. Wymagania dotyczące mieszanki betonowej i stwardniałego betonu przedstawiono w tabeli 2 [5, 10].

**Tabela 1. Właściwości kruszywa grubego zastosowanego w badaniach**  
Table 1. Properties of the coarse grit used for the project

Właściwości kruszywa	Wyniki badań
Gęstość ziaren wg PN-EN 1097-6	2,82
Uziarnienie wg PN-EN 933-1, kategoria	Gc 85/20
Zawartość pyłu mineralnego wg PN-EN 933-1	0,7 ( $f_{1,5}$ )
Kształt kruszywa grubego – wskaźnik płaskości wg PN-EN 933-3	10 ( $FI_{1,5}$ )
Odporność kruszywa na rozdrabnianie wg PN-EN 1097-2	19 ( $LA_{20}$ )
Mrozoodporność wg PN-EN 1367-1	0,6 (F1)
Mrozoodporność wg PN-EN 1367-6 badana w 1% NaCl	3,9 ( $F_{NaCl}$ ) <sup>6</sup>
Reaktywność kruszywa – metoda przyspieszona w 1N roztworze NaOH w temperaturze 80°C	ASTM C1260-14 – kruszywo niereaktywne

**Tabela 2. Założone wymagania dotyczące mieszanki betonowej i betonu**

Table 2. Assumed requirements for a concrete mix and hardened concrete

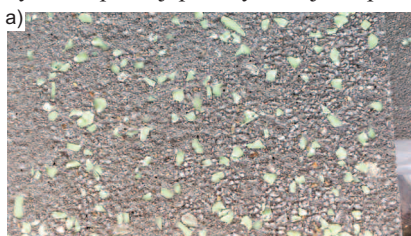
Właściwości	Wymagania	Metoda badania
Klasa konsystencji	S3	PN-EN 12350-2
Zawartość powietrza w mieszance betonowej [%]	6,5 ± 1,0	PN-EN 12350-7
Klasa betonu	C30/37	PN-EN 12390-3
Wytrzymałość betonu na rozciąganie przy rozłupywaniu [MPa]	min 3,0	PN-EN 12390-6
Mrozoodporność F150, przy badaniu odporności betonu na działanie mrozu: – ubytek masy próbki [%], nie więcej niż: – spadek wytrzymałości na ściskanie [%], nie więcej niż:	5 20	PN-B-06265:2018-10
Kategoria mrozoodporności wg PN-EN 13877-2 – odporność na zamrażanie i rozmrażanie w obecności soli odładzających	FT2	metoda własna oparta na PKN-CEN/TS EN 12390-9*

\* W przypadku odporności na zamrażanie i rozmrażanie w obecności soli odładzających opracowano metodę własną w taki sposób, aby badaniu poddać powierzchnię próbki z wyekspozowanym kruszywem fotoluminescencyjnym

### Badania laboratoryjne

Podczas prób laboratoryjnych wykonano wiele zarobów w celu określenia reologii mieszanki betonowej powiązanej z urabialnością [6, 7]. Na różnie przygotowanych powierzchniach próbek sprawdzono działania dezaktywatorów o różnej głębokości dezaktywacji (fotografia 1) oraz wykonano badania wyszczególnione w tabeli 2. Poszczególne rozwiązania materiałowe sprawdzone w laboratorium przedstawia macierz eksperymentu (tabela 3).

Badania miały na celu scharakteryzowanie właściwości betonów przeznaczonych do aplikacji przemysłowej w aspek-



**Tabela 3. Macierz badań doświadczalnych**  
Table 3. Research matrix in the experimental part

Receptura	Rodzaj kruszywa + dezaktywator						
	K2 <sup>3+</sup> +D1 <sup>4)</sup>	K2 <sup>3+</sup> +D2 <sup>4)</sup>	K2 <sup>3+</sup> +D3 <sup>4)</sup>	K3 <sup>3+</sup> +D1 <sup>4)</sup>	K3 <sup>3+</sup> +D2 <sup>4)</sup>	K3 <sup>3+</sup> +D3 <sup>4)</sup>	K2 <sup>3+</sup> +K3 <sup>3+</sup> +D3 <sup>4)</sup>
1 – ms <sup>1)</sup>	Z1	–	Z7	Z9	–	Z15	–
1 – mc <sup>2)</sup>	Z2	Z5	–	Z10	Z13	–	Z17
2 – ms <sup>1)</sup>	Z3	–	–	Z11	–	Z16	–
2 – mc <sup>2)</sup>	Z4	Z6	Z8	Z12	Z14	–	Z18

<sup>1)</sup> ms – matryca szara (niebarwiona); <sup>2)</sup> mc – matryca czarna (barwiona czarnym barwnikiem); <sup>3)</sup> K2, K3 – rodzaje kruszyw fotoluminescencyjnych; <sup>4)</sup> D1, D2, D3 – rodzaje dezaktywatorów o różnym stopniu ekspozycji (odsłonięcia kruszywa)

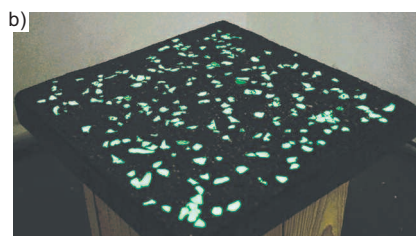
cie wykonania trwałej i funkcjonalnej nawierzchni. Do prób przemysłowych i wykonania próbnego odcinka nawierzchni wytypowano rozwiązania materiałowe o numerach Z6, Z9 oraz Z17 (tabela 4).

O ile badania podstawowych właściwości mechanicznych [8, 9] oraz mrozoodporności wewnętrznej matrycy betonowej [5] potwierdziły spełnienie wszystkich założonych wymagań, o tyle badania powierzchniowej mrozoodporności meto-

**Tabela 4. Wyniki badania wybranych rozwiązań matrycy betonowej**

Table 4. The result of research on selected concrete matrix solutions

Badana cecha	Rodzaj próbki		
	Z6 (rec. 2 – mc)	Z9 (rec. 1 – ms)	Z17 (rec. 1 – mc)
Klasa konsystencji [mm]	S3 (120)	S3 (150)	S3 (100)
Zawartość powietrza [%]	6,2	6,8	6,0
Klasa betonu i wytrzymałość na ściskanie [MPa]	C30/37 47,9	C35/45 51,9	C35/45 56,6
Wytrzymałość betonu na rozłupywanie [MPa]	4,8	5,2	5,0
Stopień mrozoodporności – ubytek masy [%]	F150 -0,24	F150 0,26	F150 -0,36
– spadek wytrzymałości [%]	7,2	4,8	9,0



**Fot. 1. Płyty betonowe z odkrytym kruszywem fotoluminescencyjnym (rozwiązanie Z9): a) w dzień; b) w nocy**

Photo 1. Concrete samples with exposed photoluminescent aggregate (solution Z9): a) during the day; b) at night

dą złuszczeniową [3] uwidocznili przede wszystkim wpływ zbyt głębokiej dezaktywacji powierzchni (tabela 5, fotografia 2).

**Tabela 5. Wyniki badania odporności na zamrażanie i rozmrażanie w obecności soli odladzających betonów o różnym składzie**  
Table 5. Test results of resistance to freezing and thawing in the presence of deicing salts of two concretes with different solutions

Próbka	Odporność na zamrażanie i rozmrażanie w obecności 3% roztworu NaCl		
	wielkość złuszczenia po 56 cyklach [kg/m <sup>2</sup> ]	stopień ubytku	klasyfikacja
Z6	0,52	1,45	FT2
Z9	0,45	2,80	FT1
Z17	1,4	2,11	FT0



**Fot. 2. Próbkę o największej destrukcji mrozozy w środowisku soli odladzających**  
Photo 2. The sample with the largest frost destruction in deicing salts

## Wykonanie odcinka próbnego nawierzchni

Jako optymalne rozwiązania laboratoryjne wybrano Z6 i Z9. Wykonano odcinek próbny, w postaci chodnika o długości ok. 40 m. Lokalizację chodnika wyznaczono w taki sposób, aby był on narażony na działanie warunków atmosferycznych, podlegał okresowo użytkowaniu przez pojazdy mechaniczne, był narażony na ścieranie oraz w trakcie zimy był na nim stosowane środki odladzające.

Chodnik podzielono na kilka sekcji w celu sprawdzenia: różnego rodzaju kruszywa fotoluminescencyjnego; wybarwienia matrycy cementowej; parametrów mieszanki betonowej (konsystencja, zawartość powietrza) [6, 7]; technologii zagęszczania i obróbki powierzchni oraz rodzajów środków dezaktywujących powierzchnię. Po ułożeniu i dezaktywacji nawierzchni wykonano dylatacje co 4 m. Wyniki badania odcinka próbnego zestawiono w tabeli 6.

Po niespełna pół roku eksploatacji pobrano odwierty z chodnika do oceny powierzchni betonu z fotoluminescencyjną aplikacją. Wyniki badań odporności

**Tabela 6. Wyniki badania próbek pobranych podczas betonowania**

Table 6. Test results of samples made during concreting

Badana cecha	Rodzaj próbki	
	(rec. 2 – mc)	(rec. 1 – ms)
Opad stożka [mm]	130 (S3)	140 (S3)
Zawartość powietrza [%]	7,0	5,9
Wytrzymałość na ściskanie [MPa]	45,5	52,0
Wytrzymałość na rozluźnianie [MPa]	6,2	5,0
Mrozoodporność	F150	F150
– ubytek masy [%]	0,44	0,51
– spadek wytrzymałości [%]	-4,74	2,35

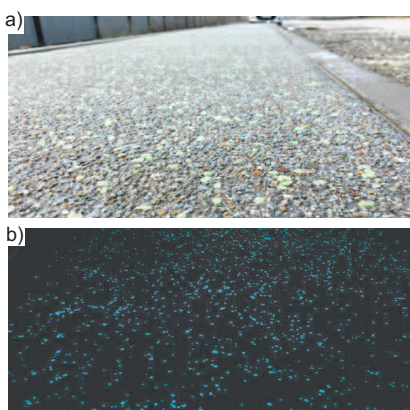
na zamrażanie i rozmrażanie w obecności soli odladzających okazały się lepsze od wyników badań laboratoryjnych [3]. Badanie mrozoodporności w 3% roztworze NaCl potwierdziło założenia projektowe oraz nie wykazało negatywnego wpływu na kruszywo pod względem mechanicznym i przyczepności do matrycy cementowej (tabela 7).

Stan techniczny odcinka próbnego (fotografia 3) jest monitorowany. Z okre-

**Tabela 7. Wyniki badania próbek rdzeniowych pobranych z konstrukcji**

Table 7. Test results on core samples cut from the structure

Próbka	Odporność na zamrażanie i rozmrażanie w obecności 3% roztworu NaCl		
	wielkość złuszczenia po 56 cyklach [kg/m <sup>2</sup> ]	stopień ubytku	klasyfikacja
(Rec. 2 – mc)/ kruszywo 2	0,05	1,87	FT2
(Rec. 1 – ms)/ kruszywo 2	0,04	1,48	FT2
(Rec. 2 – mc)/ kruszywo 3	0,05	1,42	FT2
(Rec. 1 – ms)/ kruszywo 3	0,06	1,89	FT2



**Fot. 3. Odcinek próbny nawierzchni: a) w dzień; b) w nocy**

Photo 3. Test section of the surface: a) during the day; b) at night

ślona częstotliwością wykonywane są przeglądy nawierzchni i sprawdzana jest powierzchnia pod kątem ewentualnej destrukcji fotoluminescencyjnego agregatu oraz intensywności świecenia.

## Podsumowanie

Betony nawierzchniowe z eksponowanym kruszywem fotoluminescencyjnym pozwalają przełamać szarość i czerń obecnie stosowanych nawierzchni. Dzięki odpowiedniej teksturze uzyskanej przez ekspozycję kruszywa nawierzchnia wykazuje doskonałe właściwości antypoślizgowe. Możliwe jest także wykonanie nawierzchni z mikroteksturą, która będzie doskonale funkcjonować jako ścieżka rowerowa. Zaletą takiego rozwiązania jest efekt „zimnego świecenia”, który oprócz niezaprzeczalnych wrażeń estetycznych i wizualnych widocznych po zachodzie słońca, zwiększa również poziom bezpieczeństwa w miejscach o ograniczonym oświetleniu.

## Literatura

- [1] Bulina Maria, Dmitry Chudakov i inni. 2006. „A genetically encoded photosensitizer”. *Nat Biotechnol* 24 (1): 95-9. / pmid:16369538.
- [2] Jabłoński Aleksander. 1933. „Efficiency of AntiStokes Fluorescence in Dyes”. *Nature*, vol. 131.
- [3] PKN-CEN/TS 12390-9:2017-07 Badania betonu – Część 9: Oznaczanie odporności na zamrażanie i rozmrażanie w obecności soli odladzających – Złuszczenie.
- [4] Pluciński Tomasz. 1997. *Doświadczenia chemiczne*. Warszawa. Wydawnictwo Adamantan.
- [5] PN-B-06265 Krajowe uzupełnienie normy PN-EN 206:2016-12 Beton. Wymagania, właściwości, produkcja i zgodność.
- [6] PN-EN 12350-2:2011 Badania mieszanki betonowej – Część 2: Badanie konsystencji metodą opadu stożka.
- [7] PN-EN 12350-7:2011 Badania mieszanki betonowej – Część 7: Badanie zawartości powietrza – Metody ciśnieniowe.
- [8] PN-EN 12390-3:2011 Badania betonu – Część 3: Wytrzymałość na ściskanie próbek do badań.
- [9] PN-EN 12390-6:2011 Badania betonu – Część 6: Wytrzymałość na rozciąganie przy rozluźnianiu próbek do badań.
- [10] PN-EN 206+A1:2016-12 Beton – Wymagania, właściwości, produkcja i zgodność.
- [11] Przibram Karl. 1935. „Fluorescence of Fluorite and the Bivalent Europium Ion”. *Nature*: 135.
- [12] Rizzuto R. Philipp, Brini Marisa i inni. 1995. „Chimeric green fluorescent protein as a tool for visualizing subcellular organelles in living cells”. *Curr Biol*. 5 (6): 635-42. / pmid:7552174.

Przyjęto do druku: 28.05.2019 r.