

Projektowanie lekkich mieszanek betonowych zbrojonych włóknami na konkurs ACI – FRC Bowling Ball 2023

Design of lightweight concrete mixes reinforced with fibres for the ACI – FRC Bowling Ball 2023 competition

dr inż. Norbert Olczyk (ORCID: 0000-0002-4261-4946), inż. Julia Błaż, Karolina Iwańska, Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska, Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie

DOI 10.5604/01.3001.0053.7008

Streszczenie: Artykuł przedstawia proces projektowania i wykonania lekkiej mieszanki betonowej zbrojonej włóknami spełniającej regulaminowe kryteria konkursu „FRC Bowling Ball Competition 2023” organizowanego przez American Concrete Institute (ACI) w San Francisco USA.

Słowa kluczowe: lekka mieszanka betonowa, zbrojenia włóknami, fibrobeton, kula do kręgli.

Abstract: The article presents the design process and making a fiber reinforced lightweight concrete in accordance with the rules of the “FRC Bowling Ball Competition 2023” organized by the American Concrete Institute, San Francisco USA.

Keywords: light concrete mix, fiber reinforcement, fiber concrete, bowling ball.

1. Wprowadzenie

Fibrobetony (*Fibre Reinforced Concrete*) to kompozyty, których matrycę stanowi zwykły beton cementowy, zaś dodatkowym składnikiem jest zbrojenie rozproszone w postaci włókien z rozmaitych materiałów. Utworzony kompozyt składa się więc z kruchej matrycy i ciągliwego uzbrojenia, którego podstawowym zadaniem jest kontrolowanie powstawania i propagacji rys. Włókna ograniczają skurcz otaczającego je zaczynu, a więc redukują liczbę powstałych w wyniku skurczu defektów. Po obciążeniu betonu spełniają rolę elementów „zszywających” rysy i zapobiegających w ten sposób ich rozprzestrzenianiu się. Beton jest bardziej „ciągliwy”, a jego wytrzymałość zwłaszcza na rozciąganie i zginanie jest większa niż betonu o tym samym składzie bez włókien. Dzięki swoim właściwościom fibrobetony znajdują zastosowanie w budownictwie jako wytrzymałe materiały konstrukcyjne, a także jako elementy elewacyjne oraz wykończeniowe wewnętrznych i zewnętrznych powierzchni budynków. Powszechność stosowania fibrobetonów jest poparta długą listą zalet. Charakteryzują się one wysoką wytrzymałością i odpornością na korozję, co sprawia, że są trwałym materiałem budowlanym. Włókna poprawiają elastyczność betonu i odporność na uszkodzenia mechaniczne, takie jak pęknięcia, zarysowania czy rozwarstwienia [2]. Dodatek włókien zwiększa zdolności izolacyjne, co przekłada się na lepszą ochronę przed

hałasem i temperaturą niż tradycyjny beton zbrojony prętami stalowymi. W coraz częściej wykonywanych betonach ultra wysokowartościowych o wytrzymałościach ponad 200 MPa włókna są nieodzownym ich składnikiem.

Przykładem wszechstronnego zastosowania fibrobetonów są prefabrykowane tubingi, zastosowane do obudowy tunelu pod Świną, realizowanego w technologii drażenia tarczą TBM (rys.1). W całej realizacji użyto 1600 niemalże identycznych tubingów. Jeden element waży od 7,5 do 10 ton. Z uwagi na montaż elementów za pomocą maszyny TBM odchyłka na szerokości segmentu nie mogła być większa niż 0,5 mm, na grubości 1,5 mm i na długości 1 mm [7]. Cały tunel ma długość 1780 m. Dzięki zastosowaniu fibrobetonu proces prefabrykacji jednego elementu można było skrócić do jednej zmiany roboczej.

Beton lekki konstrukcyjny to beton o gęstości między 800 a 2000 kg/m³ [7], którego masa jest zredukowana dzięki zastosowaniu kruszyw lekkich, takich jak keramzyt, perlit, ekspandowany polistyren, polytag czy korek. Betony lekkie mają wiele zastosowań w budownictwie, przede wszystkim dzięki swojej niskiej masie i dobrym właściwościom izolacyjnym. [2]. Jednym z głównych zastosowań betonów lekkich jest produkcja elementów prefabrykowanych, takich jak okładziny elewacyjne, bloczki czy indywidualne elementy konstrukcyjne. Ograniczenie ciężaru własnego przekłada się na ekonomię transportu jak i montażu.



Rys. 1. Tunel pod Świną, Świnoujście

W artykule przedstawiono proces projektowania i wykonania betonowych kul do kręgłi spełniających założenia regulaminowe konkursu ACI. Aby sprostać wyzwaniom konkursu, trzeba było zaprojektować mieszankę z fibrobetonu lekkiego, a następnie technologię wykonania kul oraz przeprowadzić testy wytrzymałościowe pozwalające uzyskać jak najlepsze parametry weryfikujące przyjęte założenia konkursowe.

2. Kryteria regulaminowe konkursu – przyjęte założenia

Przed autorami artykułu, a za razem uczestnikami konkursu postawiony został problem zaprojektowania mieszanki betonowej zbrojonej włóknami, która miała posłużyć do wykonania kul do kręgłi o ściśle określonych parametrach. Kule musiały mieć średnicę 200 mm \pm 15 mm i wagę 5,5 kg \pm 0,5 kg, dobrze osadzony środek ciężkości, aby zbić jak najwięcej kręgłi oraz co było najtrudniejszym wyzwaniem – uzyskać jak najlepsze wyniki w specjalnych testach wytrzymałościowych. Aby otrzymać takie parametry, trzeba było zaprojektować beton lekki. Regulamin dopuszczał dwie drogi uzyskania zadanych wymagań:

- zaprojektowanie mieszanki betonowej o gęstości objętościowej na poziomie 1300 kg/m³,
- wykonanie betonowej kuli z lekkim rdzeniem w celu redukcji ciężaru własnego.

Ponieważ przedmiotowa kula do kręgłi musiała spełniać swoje praktyczne zadanie na torze, uczestnicy jednoznacznie stwierdzili, że wykonanie lekkiego rdzenia będzie

tożsame z trudnością właściwego osadzenia środka ciężkości, a co za tym idzie prostoliniowością toczenia się, dlatego wybrano wariant uzyskania jednorodnej mieszanki o gęstości około 1300 kg/m³. Wymagało to użycia kompozycji kruszywa naturalnego i lekkiego.

Z uwagi na przyjętą technologię wykonania kul w całości, w specjalnie zaprojektowanych formach, bez sklejanego dwóch połówek, założono zaprojektowanie mieszanki samozagęszczalnej o maksymalnej średnicy ziaren kruszywa 8 mm umożliwiającej szczelne wypełnienie skomplikowanej formy.

Kolejnym konkursowym wyzwaniem było uzyskanie odpowiednich parametrów wytrzymałościowych. Kula do kręgłi musiała przy stałym obciążeniu charakteryzować się linioowością odkształceń. Proces zniszczenia kuli musiał odbywać się w sposób przewidywalny na tyle, aby można było określić wynik przed zniszczeniem próbki, co również było jednym z ocenianych zadań konkursowych.

Regulamin ponadto dopuszczał użycie zbrojenia w postaci maksymalnie dwóch rodzajów włókien o tej samej długości z zakresu od 10 do 55 mm. Aby spełnić kryterium wagi, założono użycie kompozycji włókien stalowych i polimerowych.

3. Projektowanie mieszanki fibrobetonowej

W ramach prac laboratoryjnych przeprowadzono badania wstępne 20 różnych mieszanek betonowych zaprojektowanych z uwzględnieniem gęstości teoretycznej, spełniających wymagania materiałowe zgodnie z regulaminem konkursu, obserwując przy tym wpływ poszczególnych składników na jej właściwości reologiczne i wytrzymałościowe.

Do wykonania mieszanek użyto cementu portlandzkiego CEM I 52,5 R z cementowni Górażdże, pyłu krzemionkowego produkowanego przez Microsilica Trade, popiołu lotnego z Elektrowni Dolna Odra, superplastyfikatora SIKA POWDER 225, kruszywa naturalnego frakcji do 8 mm oraz kulistego kruszywa lekkiego penostek ze spienionego szkła o frakcjach 0–2 i 2–4 mm z firmy Astra. Zbrojenie rozproszone przyjęto w postaci kompozycji włókien stalowych i polimerowych o długości ok 35 mm. Zastosowano włókna polimerowe Polyex Mesh 2000, o wytrzymałości na rozciąganie 550–650 MPa i module sprężystości 4,8–5,9 GPa, oraz włókna stalowe o wytrzymałości na rozciąganie 1200 MPa i module sprężystości 205 GPa.

Dzięki zastosowaniu wyżej wymienionych składników w odpowiednio zaprojektowanych proporcjach mieszanka betonowa osiągnęła gęstość rzędu 1300–1350 kg/m³, co pozwala zakwalifikować ją do betonów lekkich klasy D1,4. Podczas projektowania lekkich mieszanek betonowych należy mieć na uwadze większą liczbę czynników wpływających na ich reologię. Celem zapewnienia odpowiedniej konsystencji mieszanka betonowa zaprojektowana została jako samozagęszczalna. Przy projektowaniu trzeba było zmierzyć się z wieloma problemami.

Projektowanie lekkich betonów samozagęszczalnych z dodatkiem włókien jest procesem czasochłonnym i trudnym ze względu na złożoność składu mieszanki betonowej. Powoduje to, iż każda zmiana ilościowa składników może spowodować duże zmiany zarówno pozytywne, jak i negatywne związane głównie z urabialnością mieszanki betonowej. Sposób, w jaki zachowuje się mieszanka betonowa podczas tężenia, bezpośrednio związany jest z jej właściwościami reologicznymi. Reologia zajmuje się badaniem i opisem zachowania się materiałów pod działaniem obciążeń, z uwzględnieniem upływu czasu [5]. Oznacza to, że na wielkość odkształcenia materiału nie wpływa tylko wartość obciążenia, ale także czas jego trwania i prędkość.

Z uwagi na złożoność mechanizmów profilujących wytrzymałość betonów lekkich przy projektowaniu wymaga się, aby uwzględnić większą liczbę cech materiałowych oraz technologię wykonania [1]. Istotnym problemem jest większa nasiąkliwość wody kruszyw lekkich względem tradycyjnych. Wiąże się to z koniecznością dostosowania technologii wykonania mieszanki tak, aby woda zalegająca w porach kruszyw lekkich nie zareagowała negatywnie z cementem, zmniejszając jego wytrzymałość [4]. O konsystencji mieszanki decyduje w dużej mierze ilość wody, a co za tym idzie – właściwy stosunek wodno-cementowy. Z powodu znacznej różnicy między gęstościami objętościowymi kruszywa lekkiego i otaczającej go matrycy cementowej kruszywo grube ma tendencje do wypływania na powierzchnię, jeśli tylko zaczyn cementowy nie ma odpowiedniej lepkości, a co się z tym wiąże – betony te wykazują jeszcze większą skłonność do segregacji składników niż w przypadku betonów samozagęszczalnych o normalnej gęstości [3]. Dobranie odpowiedniego stosunku w/c , jak i występujące znaczące różnice w gęstości materiałów użytych do wykonania mieszanki betonowej, niejednokrotnie stawały przed uczestnikami konkursu problem z jej segregacją, a stosunkowo duża ilość użytych włókien generowała problem ich równomiernego rozmieszczenia w masie oraz pogarszała urabialność mieszanki.

Po przeprowadzonej I serii badań do dalszych rozważań wybrano dwie receptury: M12 i M19, z których mieszanki wykazywały najbardziej odpowiadające parametry fizyczne stawiane przez regulamin konkursu. Wyniki badań kul wykonanych z tych mieszanek przedstawiono w tabeli 1.

Obie wybrane receptury miały ten sam zestaw składników o nieznacznie zróżnicowanych proporcjach. Z uwagi na know-how szczegółowy skład ilościowy mieszanek konkursowych nie został podany w treści artykułu.

4. Wykonanie fibrobetonowych kul

Wybór mieszanki betonowej do wykonania kul nie zamykał listy problemów, które należało rozwiązać podczas procesu formowania przedmiotowej kuli. O ile geometrię udało się stosunkowo łatwo uzyskać, przez zamodelowanie w programie graficznym odpowiedniej formy szalunku, wydrukowanego na drukarce 3D z wykorzystaniem filamentu PLA, dającego możliwość łatwego zaformowania, ułożenia w niej mieszanki oraz rozformowania, o tyle umieszczenie w formie odpowiedniej ilości mieszanki, do uzyskania jej pełnego wypełnienia, odpowietrzenie mieszanki i poprawne jej zawibrowanie stanowiło nie lada problem. Formy szalunkowe oraz proces układania mieszanki betonowej w formach przedstawiono na rysunku 2.



Rys. 2. Formy szalunkowe oraz układanie mieszanki betonowej w formach

Największy wpływ na powtarzalność wyników i osiągnięcie zamierzonego efektu miał niestety czynnik ludzki. O ile zastosowano tę samą technologię wykonania mieszanki w tych samych warunkach laboratoryjnych, o tyle osiągnięcie powtarzalności wyników w dużej mierze zależało od dokładności prac wykonanych przez studentów. Wypełnianie formy betonem, po jej uprzednim złożeniu oraz dokładnym uszczelnieniu połączeń między elementami, odbywało się przez mały otwór, w dwóch etapach. Przez to należało zwrócić szczególną uwagę na zagęszczenie mieszanki. Początkowo używano jedynie stolika wibracyjnego. Po rozformowaniu widać było skumulowane miejscowo włókna stalowe. Powodowało to przesunięcie środka ciężkości poza rdzeń, a tym samym nie pozwalało określić trajektorii toru toczenia się kuli. W celu uzyskania mieszanki o większej jednorodności zwiększono ilość jednorazowo wykonywanego zarobu oraz położono większy nacisk na regularne, ręczne przemieszanie przed ułożeniem w formie.

Tabela 1. Charakterystyczne parametry kul wykonanych z mieszanek M12 i M19

Lp.	Numer mieszanki	Masa formy [kg]	Masa mieszanki w formie [kg]	Masa kuli po 7 dniach [kg]	Średnica kuli [mm]	Objętość kuli [cm ³]	Gęstość betonu [kg/m ³]
1	M12 kula 1	1,98	7,42	5,51	200,2	4197	1313
2	M12 kula 2	1,74	7,10	5,49	198,7	4103	1338
3	M19 kula 1	1,98	7,62	5,35	198,8	4111	1301
4	M19 kula 2	1,74	7,48	5,76	200,5	4218	1366

5. Wyniki badań wytrzymałościowych

Po analizie wymagań wytrzymałościowych stawianych przez regulamin konkursu, tj. uzyskanie jak najmniejszego odchylenia standardowego pomiaru siły przy wymuszonym przemieszczeniu w zakresie od 5 do 25 mm, przy odczytach co 5 mm, stwierdzono iż mieszanka konkursowa powinna być wykonana z betonu niskiej klasy, który będzie podatny na zarysowanie, a plastyczność odształceń zapewnią włókna. Wytrzymałość na ściskanie wykonana na kostkach o wymiarach 10x10x10 cm po 7 dniach dojrzewania wyniosła odpowiednio dla mieszanek M12 i M19 około 16,6 i 21,2 MPa. Punktowe odczyty sił w czasie procesu niszczenia zestawiono w tabeli 2. Badania przeprowadzono po 7 dniach od wykonania mieszanki. Charakter zniszczenia kul 1, 2, 3, 4 przedstawiono na rysunkach 3 i 4.

Najbardziej zbliżony do liniowego wykres siły uzyskano dla kul wykonanych z mieszanki M12. Różnica między wartościami skrajnymi dla całym odcinku pomiaru wynosiła przy dwóch przedstawionych próbach niszczących dla mieszanki M12 kolejno 8,55 oraz 14,25 kN.

Badanie kuli, kulę po badaniu oraz rozłam przedstawiono na rysunku 5.

Na podstawie przeprowadzonych badań i analiz jako mieszankę konkursową wybrano mieszankę M12, która najlepiej odpowiadała postawionym przez regulamin wymaganiom.



Rys. 5. Kule w trakcie badań i po badaniu

6. Zmagania i wyniki konkursowe

Ostatecznie wykonano 3 kule, z którymi pojechano na zawody, z czego dwie poddano testom konkursowym, a trzecia była zapasowa. Kule zostały zważone, zmierzone i oznakowane przez członków komisji konkursowej (rys. 6). Wyniki pomiarów przedstawiono w tabeli 3.

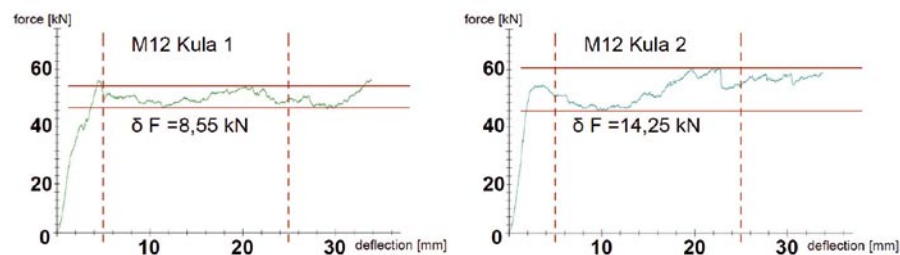
Tabela 3. Właściwości fizyczne kul konkursowych

Lp.	Masa kuli [g]	Średnica [mm]	Średnica uśredniona [mm]	Objętość [cm ³]	Gęstość betonu [kg/m ³]
1	5589,5	205,2	203,6	4419	1265
		201			
		204,7			
2	5507,5	198,6	198,3	4079	1350
		198,1			
		198,1			

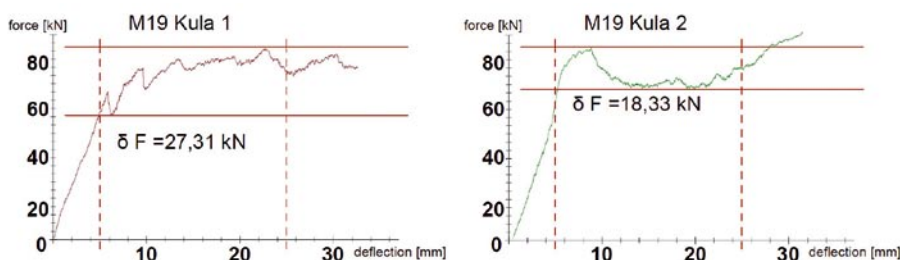
Tabela 2. Zestawienie pomiarów siły

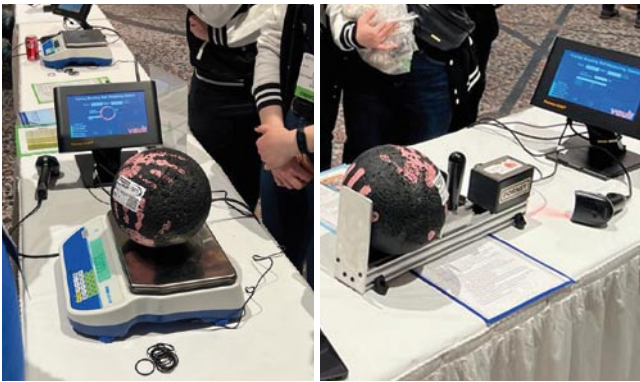
Lp.	Przemieszczenie	5 mm	10 mm	15 mm	20 mm	25 mm	Odchylenie standardowe	Cov [%]
	Numer mieszanki	siła [kN]	siła [kN]	siła [kN]	siła [kN]	siła [kN]		
1	M12 kula 1	52,8	50,9	52,1	55,7	53,3	1,59	3,0
2	M12 kula 2	56,4	48,7	55,9	59,8	57,4	3,72	6,7
3	M19 kula 1	63,4	73,1	76,8	80,1	86,4	7,65	10,1
4	M19 kula 2	56,5	79,8	72,4	71,5	76,8	8,03	11,3

Rys. 3. Wykres zniszczenia kul 1 i 2 wykonanych z mieszanki M12



Rys. 4. Wykres zniszczenia kul 3 i 4 wykonanych z mieszanki M19





Rys. 6. Pomiar właściwości fizycznych kuli konkursowej

Po kwalifikacji wstępnej i dopuszczeniu do dalszej części badań kule zostały poddane testom praktycznym i wytrzymałościowym. Test praktyczny – gra w kręgle, nie był niczym innym jak weryfikacją geometrii wykonanej kuli i właściwie osadzonego środka ciężkości. Kula została ustawiona na pochylni i wprowadzona w ruch swobodnym spadkiem. Tocząc się, musiała rozbić ustawione kręgle. Uzyskany przez uczestników w tym teście wynik to 58 punktów na 60 możliwych. Schemat regulaminowego toru oraz zmagania konkursowe przedstawiają rysunki 7 i 8.

Ostatnim i najtrudniejszym sprawdzianem były testy wytrzymałościowe. Odczyt siły co 5 mm wymuszonego przemieszczenia oraz wyniki testu przedstawiono w tabeli 4.

Końcowy współczynnik kowariancji wyniósł 8,1% i był najniższym uzyskanym wśród wszystkich 33 drużyn konkursowych.

7. Podsumowanie

Osiągniętym rezultatem w rzeczywistości nie jest sama w sobie kula do kręgli, ale umiejętności, które nabyli studenci. Zmierzyli się z zaprojektowaniem lekkiej mieszanki betonowej zbrojonej włóknami, która miała zostać użyta w konkretnym celu, której zostały postawione bardzo precyzyjnie określone wymagania. Zaprojektowanie, a następnie wykonanie betonu o gęstości objętościowej rzędu 1300 kg/m^3 , którego proces zniszczenia jest przewidywalny, okazało się nie lada wyzwaniem. Wykonane przez studentów prace nad konkursową kulą zestawily teorię z praktyką oraz uwidoczniły masę problemów, które na etapie realizacji stawały się trudne do rozwiązania. Studenci przeszli przez proces nie tylko

Rys. 7. Schemat rampy i toru do gry [8]

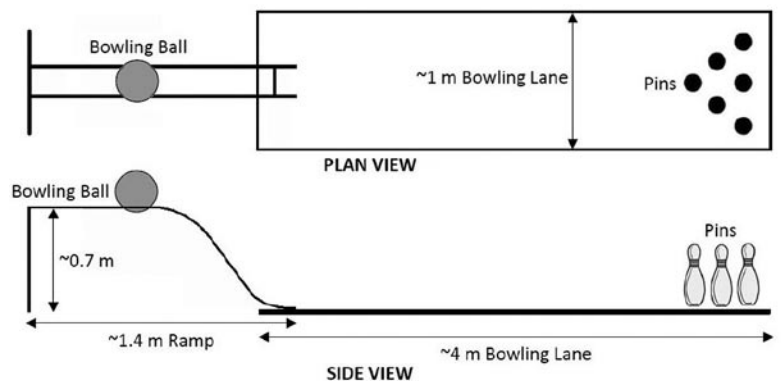


Tabela 4. Zestawienie pomiaru siły

Lp.	Przemieszczenie Numer mieszanki	5 mm	10 mm	15 mm	20 mm	25 mm	Odchylenie standardowe	Cov [%]
		siła [kN]	siła [kN]	siła [kN]	siła [kN]	siła [kN]		
1	Kula 1	57,8	70,1	72,4	67,9	73,2	5,56	8,1



Rys. 8. Test praktycznego zastosowania i badania wytrzymałościowe

związany z realizacją określonego celu – jak zaprojektowanie i wykonanie formy, sporządzenie receptury mieszanki, ułożenia mieszanki betonowej w formie, nie wspominając już o określeniu jej docelowej masy w dniu badania, z dokładnością co do dkg, już na etapie betonowania, ale również współpracy w grupie, dzieleniu się zadaniami, poczuciu obowiązku i odpowiedzialności względem reszty osób. Dobre wyniki badań generowały radość, nowe problemy, nowe zmartwienia. Na szczęście trud się opłacił. Zarówno szczecińskiej drużynie, jak i wszystkim uczestnikom konkursu gratulujemy!

BIBLIOGRAFIA

- [1] Domagała L., Lekkie betony konstrukcyjne- projektowanie, wykonywanie, właściwości, Przegląd budowlany 9/2016, str. 38–44
- [2] Karwowska J., Łapko A., Przydatność stosowania nowoczesnych kompozytów fibrobetonowych w konstrukcjach budowlanych, Civil and Environmental Engineering/Budownictwo i Inżynieria Środowiska 2/2011, str. 41–46
- [3] Kaszyńska M., Lekkie betony samozagęszczalne do konstrukcji mostowych, Nowoczesne Budownictwo Inżynieryjne 3–4/2009, str. 68–72
- [4] Kaszyńska M., Rucińska T., Wpływ kompozycji kruszywa na właściwości lekkich betonów samozagęszczalnych, Dni betonu 2008
- [5] Szwabowski J., Reologia mieszanek na spoiwach cementowych, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice, 1999, str. 20–30
- [6] <https://swinoujscie.naszemiasto.pl/ciekawostki-o-tunelu-pod-swina-mrozenie-wiercenie-wyjatkowo/ga/c3-8768075/zd/70401563>
- [7] PE-EN 206: Beton. Wymagania, właściwości, produkcja i zgodność
- [8] Regulamin konkursu FCR Bowling Ball Competition 2023