

# Betony z proszków reaktywnych i ich zastosowanie w konstrukcjach zespolonych

Dr inż. Arkadiusz Denisiewicz, Instytut Budownictwa, Uniwersytet Zielonogórski

## 1. Wprowadzenie

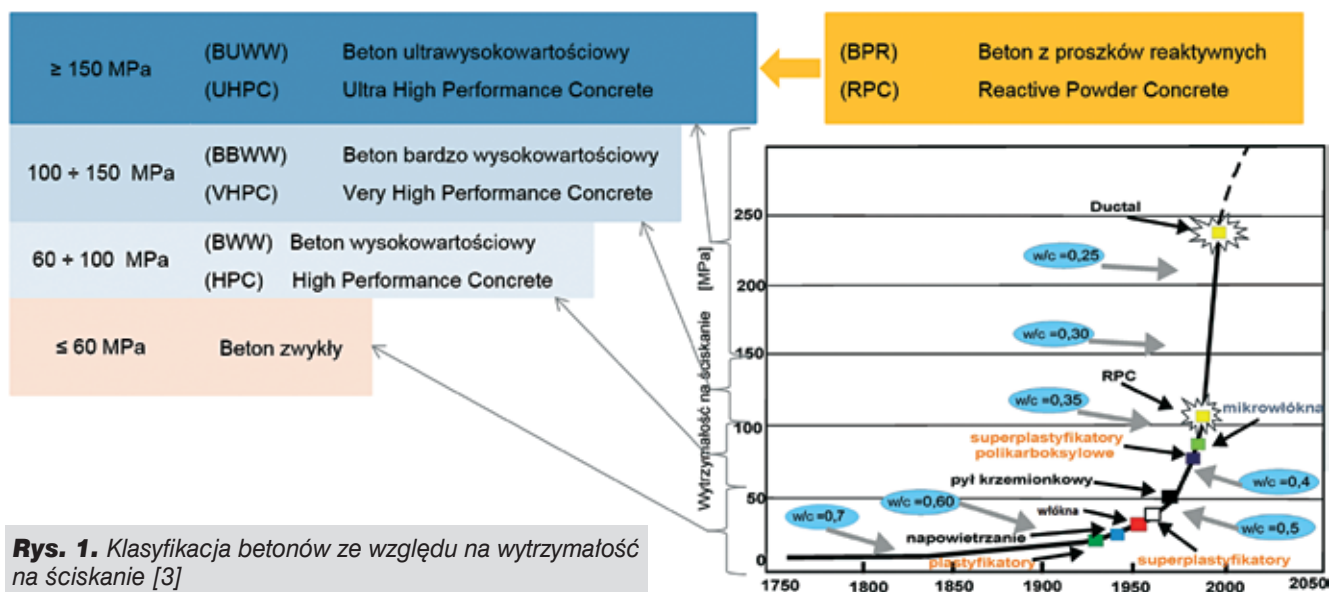
Technologia betonów wysokowartościowych i ultrawysokowartościowych jest efektem sukcesywnego usuwania wad betonów tradycyjnych poprzez stosowanie odpowiednich domieszek i dodatków oraz rozwoju chemii budowlanej. Największą słabością tego materiału należy się doszukiwać w nieciągłości struktury, które związane są głównie z [7]:

- porowatością i strukturą porów (głównie kapilarnych),
- niejednorodnym rozmieszczeniem składników oraz produktów hydratacji w objętości betonu,
- występowaniem międzyfazowych granic i stref przejściowych,
- występowaniem obok wiązań chemicznych słabych wiązań drugiego rodzaju.

Najbardziej istotnym parametrem wpływającym na wytrzymałość i trwałość betonu jest porowatość oraz skład i budowa strefy przejściowej kruszywo – matryca cementowa. Istnieje wiele sposobów zmniejszenia ilości porów kapilarnych [6, 14]. Między innymi zastosowanie dodatku w postaci pyłu krzemionkowego [8, 15],

który wpływa również na skład, strukturę i zmniejszenie grubości strefy przejściowej. Klasyfikację betonów można prowadzić pod kątem różnych właściwości, takich jak: trwałość, mrozoodporność, szczelność, urabialność itp., jednak najważniejszą cechą pozostającą nie bez wpływu na pozostałe jest wytrzymałość mechaniczna. Na rysunku 1 przedstawiono podział betonów pod kątem tego kryterium, opierając się na technologicznej krzywej rozwoju betonu [3].

Beton z proszków reaktywnych (skrót BPR lub ang. RPC od Reactive Powder Concrete) należy do grupy betonów ultrawysokowartościowych (rys. 1). Często klasyfikowany jest jako kompozyt na bazie cementu lub tzw. ceramika niskotemperaturowa [22]. Za twórcę betonu z proszków reaktywnych uważany jest Francuz Pierre Richard, były dyrektor do spraw naukowych grupy przemysłowej Bouygues, która w roku 1992 opatentowała produkt o nazwie handlowej DUCTAL®, który należy zaliczyć do BPR. Materiał ten charakteryzuje się bardzo dużą zawartością cementu i pyłu krzemionkowego, niskim stosunkiem wodno spoiwowym, stosowaniem zbrojenia rozproszonego w postaci mikrowłókien oraz ograniczeniem rozmiaru kruszywa do 600 μm,



Rys. 1. Klasyfikacja betonów ze względu na wytrzymałość na ściskanie [3]



Rys. 2. Kładka pieszo-rowerowa w miejscowości Sherbrooke w Kanadzie [2]: a) widok, b) przekrój poprzeczny przęsła



Rys. 3. Most Gärtnerplatz w miejscowości Kassel w Niemczech [19]: a) widok, b) przekrój poprzeczny przęsła

przy czym średni wymiar grubszych ziaren wynosi około 200  $\mu\text{m}$ . Zastosowanie tak małych frakcji w praktyce sprowadza się do stosowania jako wypełniacza drobnych piasków. Zabieg ten miał na celu wyeliminowanie słabego ogniwa, jakim przy dużych wytrzymałościach na ściskanie (powyżej 150 MPa) są grube kruszywa [1] oraz ujednorodnienie mikrostruktury gotowego materiału poprzez lepsze upakowanie ziaren i jednoczesne ograniczenie porowatości. Dodatkowo stosuje się obróbkę cieplno-wilgotnościową, aby jeszcze bardziej poprawić mikrostrukturę stwardniałego betonu [1, 9].

## 2. BPR w konstrukcjach zespolonych

Większość zastosowań betonów z proszków reaktywnych dotyczy konstrukcji obiektów mostowych [2, 20, 7]. Oprócz realizacji typowych ustrojów nośnych wykonanych w całości z BPR lub w postaci konstrukcji zespolonych (najczęściej stalowo-betonowych) można znaleźć w literaturze polskiej i światowej przykłady zastosowania tego materiału do wzmacniania istniejących elementów wykonanych z betonu zwykłego [7, 12]. Beton z proszków reaktywnych wykorzystuje się również do budowy obiektów wymagających znacznych trwałości oraz w celu nadania budowli wyjątkowego wyrazu architektonicznego [7]. Betony BPR charakteryzują się modułem Younga oscylującym wokół wartości 50 GPa, a nawet 75 GPa dla mieszanek o najlepszym

upakowaniu ziaren kruszywa. Dzięki dużej wytrzymałości i ciągliwości tych materiałów można znacznie zredukować ciężar budowanych z nich konstrukcji i wymiary jej przekrojów poprzecznych. Dobrym tego przykładem jest płyta pomostu kładki pieszo-rowerowej w miejscowości Sherbrooke w Kanadzie (rys. 2) o grubości zaledwie 3 cm. Obiekt ten jest pierwszym na świecie (1997 r.), w którym zastosowano BPR. Całkowita długość kładki to 120 m.

Przeprawa składa się z pięciu przęseł: środkowego o rozpiętości 60 m i czterech dojazdowych. Przęsło środkowe zbudowane jest z sześciu prefabrykowanych segmentów o długości 20–22 m i konstrukcji zespolonej (rys. 2). Pas górny dźwigara kratowego będący zarazem płytą pomostu oraz pas dolny wykonane są z betonu BPR, natomiast krzyżulce to rury ze stali nierdzewnej. Całość konstrukcji jest połączona poprzez sprężenie.

Most Gärtnerplatz w miejscowości Kassel w Niemczech zbudowany w 2007 r. jest pierwszym zastosowaniem BPR w tym kraju (rys. 3).

Ustrój nośny 136 m przeprawy stanowi siedmioprzęsłowa konstrukcja zespolona. Płytę pomostu o szerokości 5 m i grubości w najcieńszym miejscu 8,5 cm wykonano z BPR oraz zespolono ze stalową kratownicą. Prefabrykowane segmenty połączono za pomocą klejów epoksydowych. Takie rozwiązanie układu konstrukcyjnego pozwoliło znacznie (o około 500 t) zmniejszyć ciężar konstrukcji w porównaniu z tradycyjnym sprężonym przekrojem skrzynkowym.

Ciekawe badania dotyczące zastosowania kleju epoksydowego jako łącznika w zespolonych belkach stalowo-betonowych, w których stosowano beton wysokowytrzymałościowy można znaleźć w pracy [10].

Do dzisiaj na całym świecie trwają intensywne badania nad betonami typu BPR, pomimo upływu 17 lat od pierwszego zastosowania tematyka nie została wyczerpana. Prowadzone są również badania nad zastosowaniem betonów ultrawysokowartościowych do wzmacniania istniejących konstrukcji wykonanych z betonów tradycyjnych [7]. Ciekawym pomysłem jest zespolenie dwóch rodzajów betonu w jednym elemencie w celu podniesienia jego parametrów wytrzymałościowych [18]. Ze względu na swoje właściwości beton z proszków reaktywnych, jak i inne rodzaje betonów wysoko- i ultrawysokowartościowych znajdują coraz to większe zastosowanie w szeroko pojętych konstrukcjach zespolonych. Głównym czynnikiem hamującym upowszechnienie tego typu materiałów w budownictwie jest koszt wytworzenia 1 m<sup>3</sup> mieszanki, niestety ciągle stosunkowo wysoki.

### 3. Beton z proszków reaktywnych

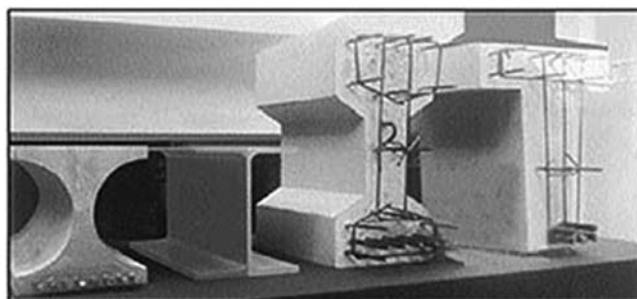
Betony z proszków reaktywnych w swoim składzie nie zawierają żadnych nadzwyczajnych składników. Cement, kruszywo, woda, dodatki (np. pył krzemionkowy) i domieszki (np. superplastyfikatory), włókna stalowe, z których składa się BPR, znane są z technologii betonów tradycyjnych. Wysokie parametry wytrzymałościowe otrzymywane są dzięki odpowiedniemu doborowi składników i zabiegów pielęgnacyjnych [17] tak, aby udoskonalić właściwości gotowego materiału głównie poprzez:

- poprawę jednorodności dzięki eliminacji ze składu grubego kruszywa i redukcję jego ilości w stosunku do matrycy cementowej,
- stosowanie maksymalnie niskiego stosunku w/s (wodno/spoiwowego),
- poprawę upakowania składników dzięki optymalnemu doborowi składu ziarnowego oraz zastosowaniu wiązania w warunkach wysokiego ciśnienia,
- poprawę mikrostruktury dzięki zastosowaniu obróbki cieplnej podczas pielęgnacji,
- zwiększenie ciągliwości poprzez wprowadzenie do składu włókien (mikrowłókien) stalowych.

Takie podejście do projektowania składu i wytwarzania BPR daje w efekcie materiał o właściwościach przewyższających znacznie betony tradycyjne i różne formy jego zastosowania: żelbet, strunobeton, kablobeton. Betony z proszków reaktywnych mogą swobodnie konkurować z jednym z najwytrzymalszych materiałów stosowanych w budownictwie, a mianowicie ze stalą. Dobrym przykładem jest zestawienie przekrojów dźwigarów belkowych wykonanych z różnych materiałów pokazane na rysunku 4.

Najważniejszym czynnikiem powodującym wysoką wytrzymałość BPR jest duże ograniczenie powstawania rys

spowodowanych np. obciążeniem lub skurczem, poprzez stosowanie włókien oraz zredukowanie maksymalnego rozmiaru ziarna kruszywa  $\leq 600 \mu\text{m}$  i zdegradowanie ich do mikrorys [17, 13]. Dzieje się tak, ponieważ propagacja takich spękań rozpoczyna się od styku matrycy cementowej z ziarnem kruszywa, a ich wielkość jest wprost proporcjonalna do średnicy takiego sferycznego wtrącenia. Niska porowatość, a co za tym idzie duża



Section Parameters	RAC X-shaped	Steel wide-flange	Prestressed concrete	Reinforced concrete
Section Depth	360 mm	360 mm	700 mm	700 mm
Weight	130 kg/m	110 kg/m	470 kg/m	530 kg/m

Comparison of beam cross sections of equal moment capacity

Rys. 4. Belki o tej samej nośności wykonane z różnych materiałów, od lewej: BPR, stal, żelbet sprężony, żelbet [23]

szczelność i wytrzymałość betonów z proszków reaktywnych jest efektem dobrego skomponowania składu ziarnowego. Pyły i drobne cząstki mniejsze niż 125  $\mu\text{m}$ , ziarna cementu, pyłu krzemionkowego oraz innych obojętnych lub reaktywnych proszków tworzą szczelny stos okrucowy. Przy tak skomponowanym kruszywie ilość wody zarobowej, jaką trzeba dodać do betonu, aby otrzymać mieszankę o wymaganej płynności, jest minimalna. Pozwala to na uzyskanie niskich stosunków wodno/spoiwowych na poziomie 0,2 i poniżej. Dodatek w postaci pyłu krzemionkowego ma podwójne zastosowanie. Pełni rolę bardzo drobnego wypełniacza i jest częścią spoiwa, ponieważ przejawia aktywność pucolanową. Efektem obecności pyłu krzemionkowego w składzie BPR jest poprawa szczelności mikrostruktury, a także przyczepności kruszywa do matrycy spoiwowej. Wytrzymałość można również zwiększać poprzez poddanie świeżej mieszanki działaniu ciśnienia, co prowadzi do usunięcia większości uwięzionego powietrza, odprowadzenia nadmiaru wody, przeciwstawienia się chemicznemu skurczowi oraz zwiększenia relatywnej gęstości [17]. Po okresie wiązania można również zastosować obróbkę cieplną polegającą na podgrzaniu materiału do temperatury 90°C, co w istotny sposób przyspiesza reakcję pucolanową przez modyfikację struktury hydratów [17]. Pomimo że betony z proszków reaktywnych z definicji nie zawierają w swoim składzie grubszych frakcji kruszywa, czasami dopuszcza się stosowanie ziaren do 1 mm [5]. Otrzymanie wytrzymałości na ścislenie powyżej 150 MPa jest również możliwe przy zastosowaniu grubszego kruszywa [5, 16], dlatego obecne badania nad betonami

**Tabela 1.** Zaprojektowane receptury BPR

Składniki	Mieszanka I [kg/m <sup>3</sup> ]	Udział składnika [%]	Mieszanka II [kg/m <sup>3</sup> ]	Udział składnika [%]
Cement CEM I 42,5R	905	34,2	905	33,2
Pył krzemionkowy	230	8,7	230	8,4
Piasek kwarcowy 0,063–0,4 mm OS 36	702	26,6	330	12,1
Piasek kwarcowy 0,04–0,125 mm OS 38	285	10,8	285	10,5
Piasek kwarcowy 0,2–0,8 mm OS 30	---	---	335	12,3
Woda	260	9,8	260	9,5
Superplastyfikator Woerment FM 787	29,6	1,1	29,6	1,1
Mikrowłókna stalowe DM 6/0,17 KrampeHarex®	233	8,8	233	8,6
Włókna stalowe DW 38/1,0 N KrampeHarex®	---	---	117	4,3
Ciężar objętościowy	2645	---	2725	---

**Tabela 2.** Asortyment próbek przygotowanych do badań laboratoryjnych

Rodzaj próbki	Wymiary próbki [cm]	Liczba próbek [szt.]	
		Mieszanka I	Mieszanka II
Belka	10x15x200	4	4
Belecza	10x10x46	6	6
Kostka	10x10x10	6	6
Łączna liczba próbek		32	

ultrawysokowartościowymi podążają dwiema ścieżkami: drobnoziarnistego i gruboziarnistego UHPC (ang. Ultra High Performance Concrete).

#### 4. Badania laboratoryjne

Badania doświadczalne, których wyniki prezentowane są w tym punkcie, miały na celu sprawdzenie możliwości wykonania betonu z proszków reaktywnych w „warunkach placu budowy”, tzn. bez stosowania mieszanek intensywnych lub próżniowych oraz bez wykonywania zabiegów pielęgnacyjnych (obróbka cieplno-wilgotnościowa, ciśnieniowa). Badania miały na celu wyznaczenie podstawowych parametrów wytrzymałościowych zaprojektowanego BPR.

Tok postępowania przy projektowaniu betonów z proszków reaktywnych jest zupełnie inny niż w przypadku betonów tradycyjnych, ponieważ znane równania (Bolomeya, Abramsa itp.) służące do określenia wytrzymałości w zależności od składu tracą swoją ważność ze względu na niskie wartości wskaźnika w/s występujące w BPR. Równania konsystencji również przestają obowiązywać z powodu dużych ilości superplastyfikatorów występujących w składzie mieszanki. Jedyną zależnością, która zachowuje swoją ważność, jest tzw. równanie szczelności [21]. Według autora pracy [21] główną metodą stosowaną do ustalania receptur BPR jest metoda doświadczalna.

W niniejszej pracy wstępnego ustalenia receptur dokonano na podstawie studiów literaturowych oraz stosując równanie szczelności odpowiednio rozszerzone stosownie do projektowanego składu betonu. Przy projektowaniu receptur wykorzystano również zależności stosowane do określania wytrzymałości betonów wysokowartościowych, między innymi równanie de Larrarda [11].

Przed przygotowaniem właściwych próbek wykonano zaroby próbne w celu sprawdzenia opracowanych receptur. W trakcie tych badań stwierdzono konieczność zwiększenia ilości domieszki w postaci superplastyfikatora z 1% (9 litrów/m<sup>3</sup>) do 3,3% (29,6 litrów/m<sup>3</sup>) masy cementu. Wstępne przyjęcie ilości superplastyfikatora było podyktowane zaleceniami producenta. Jednak dla betonu typu BPR była to ilość niewystarczająca do uzyskania dobrej urabialności mieszanki, ponieważ ma on niski stosunek wodno/spoiwowy. Po przeanalizowaniu zarobów próbnych do wykonania docelowych elementów przyjęto receptury jak w tabeli 1.

Do badań wytrzymałościowych przygotowano łącznie 32 próbki (tabela 2) wykonane z dwóch rodzajów mieszanki (tabela 1). Asortyment ten składa się z trzech rodzajów próbek: belki, beleczi i kostki.

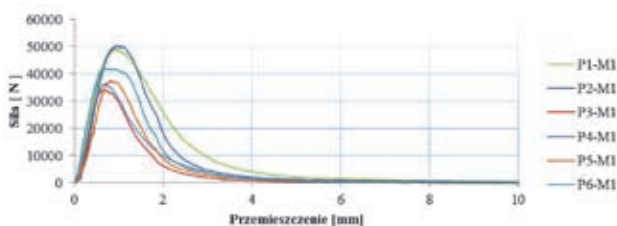
Przyjęto następujące oznaczenia próbek:

- B1-M1 ÷ B4-M1 – belki o wymiarach 10x15x200cm, wykonane z mieszanki I,
- B1-M2 ÷ B4-M2 – belki o wymiarach 10x15x200cm, wykonane z mieszanki II,
- P1-M1 ÷ P6-M1 – beleczi o wym. 10x10x46cm, wykonane z mieszanki I,
- P1-M2 ÷ P6-M2 – beleczi o wym. 10x10x46cm, wykonane z mieszanki II,
- K1-M1 ÷ K6-M1 – kostki o wymiarach 10x10x10cm, wykonane z mieszanki I,
- K1-M2 ÷ K6-M2 – kostki o wymiarach 10x10x10cm, wykonane z mieszanki II.

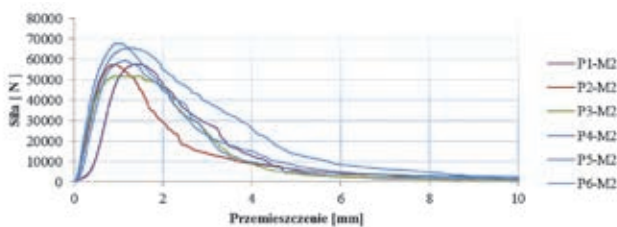
Program badań podzielono na sześć etapów:

1. wykonanie zarobów próbnych w celu weryfikacji zaprojektowanych receptur,

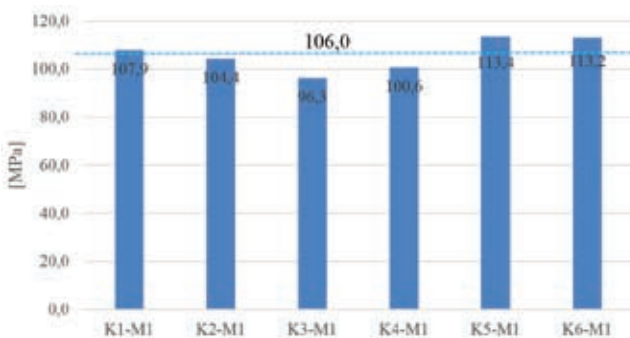
- przeprowadzenie badania wytrzymałości na ściskanie (po 7 dniach) próbek z zarobu próbnego w prasie hydraulicznej o nacisku do 3000 kN,
- wykonanie docelowych próbek,
- trzy punktowe zginanie aż do zniszczenia belek B1-M1 ÷ B4-M1 i B1-M2 ÷ B4-M2 na maszynie wytrzymałościowej INSTRON 8804 o nośności ±500 kN, pomiar deformacji w strefie zniszczenia za pomocą systemu Aramis 3D oraz punktowa kontrola odkształceń przy zastosowaniu tensometrów elektrooporowych w celu wyznaczenia modułu Younga,
- czteropunktowe badanie wytrzymałości na zginanie beleczek P1-M1 ÷ P6-M1 i P1-M2 ÷ P6-M2 na maszynie wytrzymałościowej INSTRON 8804 o nośności ±500 kN,
- badanie wytrzymałości na ściskanie kostek K1-M1 ÷ K6-M1 i K1-M2 ÷ K6-M2 na prasie hydraulicznej o nacisku 3000 kN z jednoczesnym pomiarem odkształceń w dwóch prostopadłych kierunkach tensometrami elektrooporowymi w celu wyznaczenia współczynnika Poissona.



**Rys. 5.** Przebieg badania wytrzymałości na zginanie dla próbek wykonanych z mieszanki I



**Rys. 6.** Przebieg badania wytrzymałości na zginanie dla próbek wykonanych z mieszanki II



**Rys. 7.** Wytrzymałość na ściskanie dla próbek wykonanych z mieszanki I

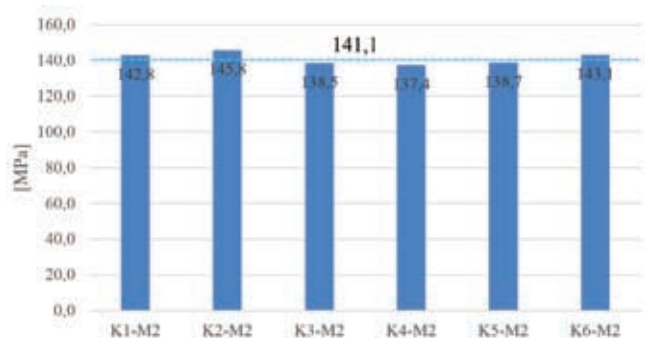
Poniżej zamieszczono część wyników badań w postaci graficznej. Kompletnie rezultaty wraz z interpretacją, opisem stanowisk badawczych oraz metodyką badań można znaleźć w pracy [4].

### 5. Podsumowanie

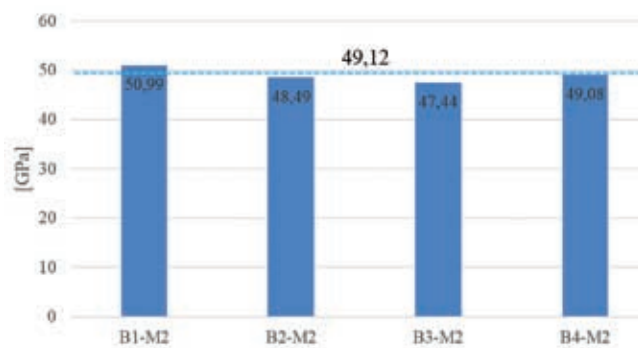
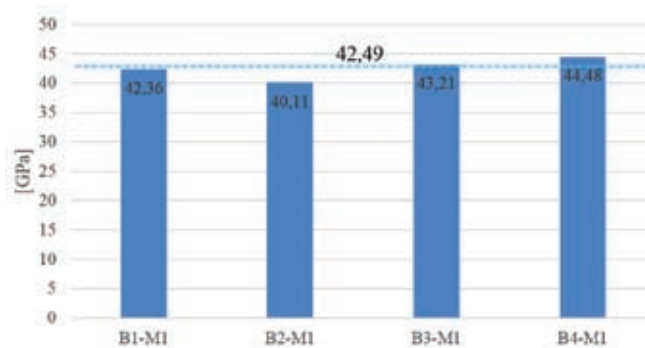
Na podstawie przeprowadzonych badań można stwierdzić, że możliwe jest wykonanie betonu typu BPR o parametrach pozwalających zakwalifikować go do grupy materiałów bardzo wysokowartościowych, używając do procesu mieszania zwykłą betoniarkę wolnospadową i nie stosując specjalnych zabiegów pielęgnacyjnych w postaci obróbki cieplno-wilgotnościowej i ciśnieniowej. Parametry BPR wykonanego w „warunkach placu budowy” nie są tak wysokie jak materiału poddanego specjalnym zabiegom pielęgnacyjnym, ale daje on szersze możliwości zastosowań (brak konieczności ograniczania się do elementów prefabrykowanych).

### BIBLIOGRAFIA

- Aitcin P. C., Trwały wysokowartościowy beton – sztuka i wiedza, Dni Betonu Tradycja i nowoczesność, Szczyrk, (2002), 7-36
- Blais P. Y., Couture M., Prestressed Pedestrian Bridge – World’s First Reactive Powder Concrete Structure, PCI Journal, 1999
- Czarnecki L., Domieszki do betonu – Możliwości i ograniczenia., Budownictwo Technologie Architektura, Zeszyt Specjalny: Domieszki do betonu (2003), 4-6
- Denisiewicz A., Modelowanie dwuskalowe związków konstytutywnych betonu z proszków reaktywnych i ich walidacja doświadczalna, Praca doktorska, Uniwersytet Zielonogórski, 2013
- Fehling E., Schmidt M., Teichmann T., Bunje K., Bornemann R., Middendorf B., Entwicklung Dauerhaftigkeit und Berechnung Ultrahochfester Betone (UHPC), Kassel University Press, Kassel, 2005
- Jamroży Z., Beton i jego technologie, PWN, Warszawa, 2005
- Jasiczak J., Wdowska, Rudnicki T., Betony ultrawysokowartościowe. Właściwości, technologie, zastosowania, Stowarzyszenie Producentów Cementu, Kraków, 2008
- Jasiczak J., Mikołajczak P., Technologia betonu modyfikowanego domieszkami i dodatkami. Przegląd tendencji krajowych i zagranicznych, WPP, 1997
- Kaszyńska M., BWW: Możliwości, cechy, zastosowania., XVII Ogólnopolska Konferencja Warsztat Pracy Projektanta Konstrukcji, Ustroń, 2002
- Kuczma B. Analiza statyczno-wytrzymałościowa zespolonych belek stalowo-betonowych o podatnych łącznikach, Rozprawa doktorska, promotor prof. T. Biliński, Uniwersytet Zielonogórski (2011)

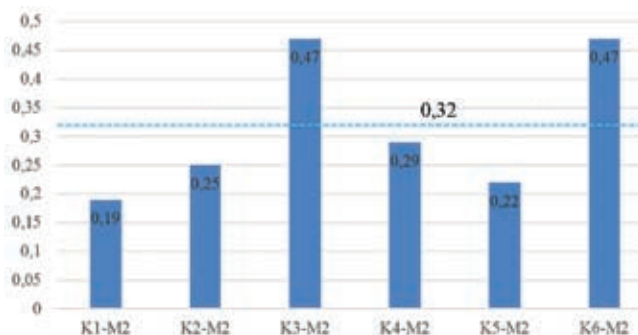
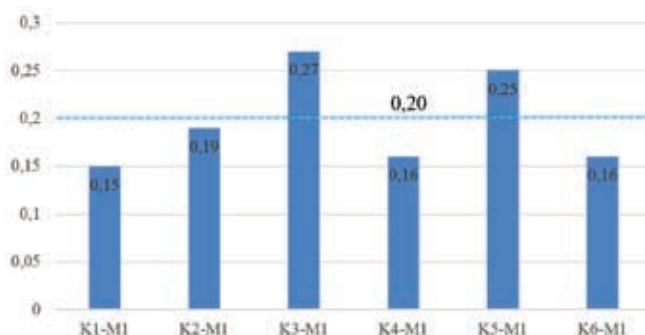


**Rys. 8.** Wytrzymałość na ściskanie dla próbek wykonanych z mieszanki II



Rys. 9. Moduł Younga dla próbek wykonanych z mieszanki I

Rys. 10. Moduł Younga dla próbek wykonanych z mieszanki II



Rys. 11. Współczynnik Poissona dla próbek wykonanych z mieszanki I

Rys. 12. Współczynnik Poissona dla próbek wykonanych z mieszanki II

[11] Larrard F. D., The Influence of Mix Composition on Mechanical Properties of High-Performance Silica Fume Concrete, 4th Int. Conf. on Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete, Istanbul, 1992  
 [12] Lee M. G., Wang Y. C., Chiu C. T., A preliminary study of reactive powder concrete as a new repair material, Construction and Building Materials, 21 (2007), 182-189  
 [13] Ma J., Orgass M., Dehn F., Schmidt D., Tue N. V., Comparative Investigations on Ultra-High Performance Concrete with and without Coarse Aggregates, in M. Schmidt, E. Fehling and C. Geisenhanslüke, eds. International Symposium on Ultra High Performance Concrete, Kassel, Germany, 2004, 205-212  
 [14] Neville A. M., Właściwości betonu, Polski Cement 2000  
 [15] Nocur-Wczelik W., Pył krzemionkowy – podstawy stosowania w technologii betonu, Materiały Ceramiczne/Ceramic Materials, 59/2 (2007), 68-71  
 [16] Orgass M., Klug Y., Fibre Reinforced Ultra-High Strength Concretes, in M. Schmidt, E. Fehling and C. Geisenhanslüke, eds., International Symposium on Ultra High Performance Concrete, Kassel, Germany, 2004

[17] Richard P., Cheyrez M., Composition of Reactive Powder Concretes, Cement and Concrete Research, 25 (1995), pp. 1501-1511.  
 [18] Sadowska-Buraczewska B., Pazik M., Beton wysokiej wytrzymałości w elementach żelbetowych zespolonych, Civil and Environmental Engineering, 3 (2012), 85-90  
 [19] Schmidt M., Teichmann T., Ultra-high-performance concrete: basis for sustainable structures, CESB 2007 PRAGUE Conference Session T1A: Keynote Addresses  
 [20] Słowik W., Zastosowanie betonów wysokowartościowych we współczesnych konstrukcjach żelbetowych, Materiały Budowlane, 2 (2005), 49-51  
 [21] Śliwiński J., Ogólne zasady projektowania betonów wysokowartościowych, Budownictwo Technologie Architektura Numer specjalny: Domieszki do betonu (2003), 29-31  
 [22] Zdeb T., Śliwiński J., Beton z proszków reaktywnych – właściwości mechaniczne i mikrostruktura, Budownictwo Technologie Architektura 51 (2010), 51-55  
 [23] <http://www.djc.com/special/concrete97/10024304.htm>

[www.przegladbudowlany.pl/archiwum](http://www.przegladbudowlany.pl/archiwum)



Archiwum od ręki  
 archiwalne spisy treści  
 na stronach www