

prof. dr hab. inż. Mieczysław Kamiński<sup>1)</sup>  
dr inż. Czesław Bywalski<sup>1)</sup>  
mgr inż. Maciej Kaźmierowski<sup>1\*)</sup>

# Badania wytrzymałości na ściskanie betonów wysokowartościowych z dodatkiem włókien stalowych

*Test compressive strength of high performance fibre reinforced concrete*

DOI: 10.15199/33.2015.06.26

(Artykuł przeglądowy)

**Streszczenie.** W artykule przedstawiono wyniki badań wytrzymałości na ściskanie betonu wysokowartościowego modyfikowanego włóknami stalowymi i polipropylenowymi. Porównano je z wynikami badań próbek bez dodatku włókien oraz przeprowadzono estymację wytrzymałości na ściskanie betonu w funkcji zawartości włókien stalowych. Wyniki badań odniesiono do literatury przedmiotu.

**Słowa kluczowe:** beton wysokowartościowy, włókna stalowe, wytrzymałość na ściskanie.

**Abstract.** The article presents the results of compressive strength test of high performance concrete reinforced with steel and polypropylene fiber. The results obtained from research are compared with compressive strength of the specimens without fiber. An estimation of concrete compression strength as a function of fiber content and the degree of fiber reinforcement are conducted. Results are referenced to literature.

**Keywords:** high performance concrete, steel fiber, compressive strength.

Wytrzymałość betonu na ściskanie jest jego najważniejszą techniczną i użytkową właściwością w kontekście projektowania konstrukcji żelbetonowych. Minimalna wartość 28-dniowej wytrzymałości betonu na ściskanie  $f_{ck, cube} \geq 60$  MPa pozwala na zakwalifikowanie go do betonów wysokowartościowych BWW [1, 5]. Wadą BWW jest kruche zniszczenie po przekroczeniu naprężeń równych wytrzymałości na ściskanie betonu. W celu ograniczenia tego efektu oraz nadania quasi-plastycznego charakteru pracy BWW, zaczęto dodawać do betonu włókna stalowe. W artykule przedstawiono wyniki badań doświadczalnych wytrzymałości na ściskanie kostek wykonanych z BWW z dodatkiem włókien stalowych oraz podjęto próbę równoczesnego zastosowania włókien stalowych i polipropylenowych.

## Program badań oraz charakterystyka badanego materiału

Program badań zakładał oznaczenie wytrzymałości betonu na ściskanie czterech serii próbek o wymiarach  $150 \times 150 \times 150$  mm (po 3 próbki każ-

dej serii), wykonanych z betonu BWW z różną ilością włókien stalowych. Seria A zawierała 1% włókien stalowych ( $78 \text{ kg/m}^3$ ); seria B–1,5% ( $118 \text{ kg/m}^3$ ), seria C–1% włókien stalowych (jak seria A) + 0,065% włókien polipropylenowych ( $0,6 \text{ kg/m}^3$ ), natomiast seria D tzw. kontrolna nie zawierała włókien.

Mieszanke betonową zaprojektowano przy założeniu klasy wytrzymałościowej C55/67 o następującym składzie: cement portlandzki CEM-I 52,5N –  $550 \text{ kg/m}^3$ , piasek  $0 \div 2 - 600 \text{ kg/m}^3$ , kruszywo granitowe  $2 \div 8 \text{ mm} - 490 \text{ kg/m}^3$ ,  $8 \div 16 \text{ mm} - 590 \text{ kg/m}^3$ , superplastifikator – 1,5% masy cementu, popiół lotny –  $30 \text{ kg/m}^3$ . W celu ustalenia wpływu dodatku włókien stalowych na konsystencję mieszanki betonowej o współczynniku wodno-cementowym  $w/c = 0,30$  wykonano próbne zaroby. Klasę konsystencji określono jako półciekłą (S4) metodą stożka opadowego. Probki z poszczególnych mieszanek pielęgnowano wg zaleceń normy [2].

Do betonu próbek serii A, B i C dodano proste stalowe włókna typu WIREX o długości  $l = 20$  mm i średnicy  $d = 0,3$  mm oraz wytrzymałości na rozciąganie  $2000 \text{ MPa}$  i module Younga  $200 \text{ GPa}$ . W przypadku serii C dodatkowo zastosowano polipropylenowe mikrowłókna fibrylowane o module Younga  $3,75 \text{ GPa}$ , długości  $l = 12$  mm i średnicy  $d = 34 \text{ }\mu\text{m}$ .

## Wyniki badań doświadczalnych

Badania wytrzymałości 28-dniowej próbek BWW przeprowadzono w prasie firmy Walter+Bai w akredytowanym Laboratorium Wydziału Budownictwa Lądowego i Wodnego Politechniki Wrocławskiej. Probki obciążano prostopadłe do kierunku betonowania z prędkością  $0,5 \text{ MPa/s}$  [3]. Specyfikację użytych próbek do oznaczenia wytrzymałości na ściskanie oraz wyniki badań przedstawiono w tabeli, natomiast obraz zniszczonych próbek oraz stanowisko badawcze na fotografii. Klasę betonu poszczególnych serii próbek ustalono na podstawie tzw. podwójnego kryterium zgodności. Przyjęto produkcję początkową betonu [4].

## Rezultaty i dyskusja wyników badań

Najmniejsze rozrzuty wyników zaobserwowano w przypadku serii B i D ( $\sigma = \pm 0,44$  i  $\pm 0,47 \text{ MPa}$ ), a największe serii C i A ( $\sigma = \pm 1,52$  i  $\pm 1,74 \text{ MPa}$ ), co mogło być spowodowane zróżnicowanym zawilgoceniem kruszywa. Dodatek włókien polipropylenowych nie poprawił wytrzymałości betonu na ściskanie, lecz nieznacznie obniżył o 2,6%, czego można było się spodziewać. Obecność włókien polipropylenowych oraz stalowych uniemożliwiła optymalne zagęszczenie

<sup>1)</sup> Politechnika Wrocławska, Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego

<sup>\*)</sup> Autor do korespondencji:

e-mail: maciej.kazmierowski@pwr.edu.pl

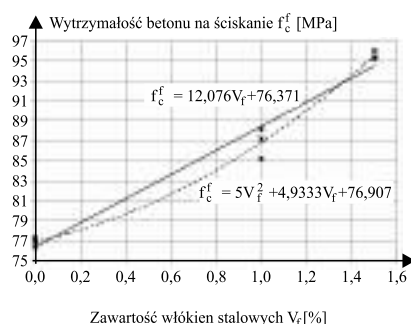
## Wyniki badania wytrzymałości na ściskanie BWW z dodatkiem włókien

The results of compressive strength BWW with the fiber

Seria	Oznaczenie próbek	Wytrzymałość na ściskanie $f_{ci}$ [MPa]	Gęstość średnia $\rho_{sr}$ [T/m <sup>3</sup> ]	Średnia wytrzymałość na ściskanie $f_{cm}$ [MPa]	Odchylenie standardowe $\sigma$ [MPa]	Klasa betonu
A	A1	85,19	2,426	86,84	1,52	C60/75
	A2	88,17				
	A3	87,16				
B	B1	95,19	2,431	95,56	0,44	C70/85
	B2	96,04				
	B3	95,44				
C	C1	86,48	2,374	84,62	1,74	C60/75
	C2	83,04				
	C3	84,35				
D	D1	77,34	2,356	76,91	0,47	C55/67
	D2	76,41				
	D3	76,97				

mieszanki betonowej (w przypadku serii C nie wykonano próbnych zarobów). Potwierdza to spadek średniej gęstości kompozytu tej serii (tabela). W rezultacie uzyskano gorszą jakość matrycy betonowej, a tym samym spadek wytrzymałości betonu na ściskanie. W związku z tym w dalszej części analizy nie uwzględniono wyników serii C.

Dodatek 1% i 1,5% włókien stalowych na 1 m<sup>3</sup> betonu w przypadku serii A i B spowodował wzrost wytrzymałości betonu na ściskanie względem serii D (kontrolnej bez włókien) odpowiednio o 12,9% i 24,3%. Na rysunku przedstawiono wyniki uzyskanych badań wytrzymałości na ściskanie betonu w funkcji zawartości procentowej włó-



**Wytrzymałość betonu na ściskanie  $f_c^f$  w funkcji procentowej zawartości włókien stalowych  $V_f$**

Compressive strength of concrete  $f_c^f$  as a function of the percentage of steel fibers  $V_f$

kien stalowych ( $V_f$ ). Na podstawie regresji liniowej lub parabolicznej oszacowano zależności funkcyjne w postaci wzorów (1) i (2). Współczynnik determinacji o wysokim poziomie dopasowania modelu wyniósł odpowiednio  $R^2 = 0,9669$  i  $R^2 = 0,9897$ .

$$f_c^f = 12,076V_f + f_c \quad (1)$$

$$f_c^f = 5V_f^2 + 4,9333V_f + f_c \quad (2)$$

gdzie:

$f_c, f_c^f$  – wytrzymałość betonu wysokowartościowego na ściskanie bez i z dodatkiem włókien stalowych [MPa];  
 $V_f$  – objętościowa zawartość włókien stalowych w 1 m<sup>3</sup> betonu [%].

Uzyskane wyniki znajdują swoje potwierdzenie w pracach [6, 7], które podają wzrost wytrzymałości na ściskanie fibrobetonów o wysokiej wytrzymałości od 10 do 20% w przypadku dodatku 0,5 ÷ 1,5% włókien stalowych.

W próbie ściskania kostek beton bez dodatku włókien niszczył się gwałtownie w sposób eksplozywny. Z kolei zniszczeniu próbek fibrobetonowych nie towarzyszyła eksplozja, pomimo wysokiej wytrzymałości na ściskanie, a po zniszczeniu próbki nie rozpadały się (fotografia). Trzeba zadać sobie pytanie, czy dodawanie włókien stalowych jest potrzebne w konkret-

• w zakresie dodatku włókien 0 ÷ 1,5% wzrost wytrzymałości na ściskanie kostek z BWW można opisać funkcją liniową (1) lub kwadratową (2). Większa procentowa zawartość zbrojenia rozproszonego ( $V_f > 1,5\%$ ) zmniejsza tempo wzrostu wytrzymałości na ściskanie BWW [7];

• dodatek włókien polipropylenowych do stalowych pogorszył jakość matrycy betonowej próbek, powodując nieznaczne obniżenie wytrzymałości BWW na ściskanie w stosunku do fibrobetonu tylko z włóknami stalowymi;

• włókna stalowe rozpraszają energię pęknięcia kompozytu, a w efekcie zmniejszają kruchość matrycy BWW.

## Literatura

- [1] ACI Committee 363. 2005. State-of-the-Art Report on High Strength Concrete.
- [2] PN-EN 12390-2:2011 Badania betonu. Wykonywanie i pielęgnacja próbek do badań wytrzymałościowych.
- [3] PN-EN 12390-3:2011 Badania betonu. Wytrzymałość na ściskanie próbek do badania.
- [4] PN-EN206-1:2003 Beton. Część 1: Wymagania, właściwości, produkcja i zgodność.
- [5] Rashid M. A., Mansur M. A. 2009. Considerations in producing high strength concrete. Journal of Civil Engineering (IEB), 37 (1): 53 – 63.



**Obraz zniszczenia próbek serii A, B, C i D (a) oraz widok prasy (b)** [Fot. M. Kaźmierowski]  
 Destroy samples of each series (from left to right: A, B, C and D) (a) and view the testing machine (b)

nych warunkach zastosowania BWW oraz w jakim stopniu ten dodatek skomplikuje proces betonowania i wpłynie na wzrost kosztów wykonania konstrukcji.

## Podsumowanie

Na podstawie uzyskanych wyników badań doświadczalnych betonów BWW z dodatkiem włókien stalowych i po przeanalizowaniu literatury [1, 5 ÷ 8] sformułowano następujące wnioski:

• dodanie 1,5% włókien stalowych do betonu BWW spowodowało wzrost jego wytrzymałości na ściskanie o 24%;

[6] Ramados P., Nagamani K.: High-Performance Fiber Reinforced Concrete under Compression and Flexure, Anna University, Chennai, India, May 2008.

[7] Sumathi A., Saravana K.: Strength Predictions of Admixed High Performance Steel Fiber Concrete, ChemTech, 8/2014, vol. 6, 4729 – 4736.

[8] Bywalski Cz., Kamiński M., Maszczak M., Balbus Ł.: Influence of steel fibres addition on mechanical and selected rheological properties of steel fibre high-strength reinforced concrete, Archives of Civil and Mechanical Engineering, 2014/ j. acme. 2014.05.013.

Otrzymano 14.04.2015 r.