

# NOWE, TRWALSZE, NIEZAWODNE



prof. dr hab. inż. Andrzej Łapko  
Politechnika Białostocka

Obserwowany w ostatnich dziesięcioleciach postęp w dziedzinie inżynierii materiałowej, szczególnie w zakresie materiałów z zakresu budownictwa, sprzyja powstawaniu nowych, bardziej ekonomicznych, trwalszych i bardziej niezawodnych rozwiązań konstrukcyjnych.

Pojawiają się coraz to nowe, wyższe klasy betonów konstrukcyjnych, o zwiększonej trwałości i podwyższonych właściwościach wytrzymałościowych, takie jak betony z rodziny HPC (High Performance Concrete) lub UPHC (Ultra High Performance Concrete), czy też kompozyty o matrycy cementowej zbrojone włóknami typu FRC (Fiber Reinforced Concrete), odporne na zwiększone odkształcenia. Obserwujemy także postęp w zakresie inżynierii materiałów stosowanych do zbrojenia betonu, zarówno w konstrukcjach żelbetowych, jak i sprężonych. Tradycyjne zbrojenie prętami lub cięgnami stalowymi jest coraz częściej zastępowane zbrojeniem niemetalicznym (FRP).

Projektant konstrukcji budowlanych, zainteresowany zastosowaniem wprowadzanych na rynek nowych materiałów musi być jednak w pełni świadomy zmienionych (w stosunku do tradycyjnych materiałów) właściwości mechanicznych, co w pewnych sytuacjach wymaga zastosowania zmienionych procedur projektowania takich innowacyjnych konstrukcji [1].

## Modyfikacje betonów stosowanych do konstrukcji nośnych

Dobór materiałów w procesie projektowania jest ważnym elementem założeń do obliczeń konstrukcji budowlanych. Wciąż pojawiają się na rynku nowe lub modyfikowane materiały budowlane, zróżnicowane pod względem zakresu wytrzymałości i trwałości użytkowej. Mając do dyspozycji szeroką gamę ofert przemysłu materiałów, projektanci mają możliwość projektowania innowacyjnych, lżejszych, bardziej ekonomicznych i trwałych rozwiązań konstrukcyjnych.

Doskonałym przykładem jest zauważalny od kilku dziesięcioleci rozwój technologii modyfikowanych betonów konstrukcyjnych (rys. 1). Klasyfikację betonów nowej generacji, w funkcji wytrzymałości na ściskanie podano w tabeli 1.

Szczególnie atrakcyjne możliwości nowych obszarów zastosowań daje betony modyfikowane włóknami (fibrobetony), które są zaliczane do materiałów kompozytowych.

Wysoka lub nawet bardzo wysoka (w porównaniu do tradycyjnych betonów) wytrzymałość na ściskanie, a w szczególności na rozciąganie, umożliwia o wiele bardziej efektywne zastosowania do wytwarzania konstrukcji żelbetowych i sprężonych, a także wzmacniania konstrukcji. Dzięki ulepszonym właściwościom wytrzymałościowym możliwe jest wytwarzanie elementów lżejszych i bardziej odpornych na deformacje. Jednocześnie niska porowatość UHPC zapewnia idealną odporność na działanie środowiska agresywnego.

Oprócz tradycyjnie stosowanych materiałów konstrukcyjnych, takich jak beton i stal konstrukcyjna, szczególnie zauważalny jest rozwój przemysłu włóknistych materiałów kompozytowych (tabela 2).

Najbardziej spektakularnym przykładem stosowanym w konstrukcjach budowlanych jest zaliczany do klasy ultra wytrzymałych (UPHC) fibrobetonowy kompozyt o nazwie DUCTAL. Posiada on szczelną mikrostrukturę, dzięki czemu charakteryzuje się wysoką mrozodpornością i odpornością na agresję chemiczną, posiada wysoka odporność ogniową, niski skurcz (poniżej 0,01 mm/m). Ze względu na wymaganą obróbkę cieplną, stosowanie betonów grupy UHPC ogranicza się głównie do elementów prefabrykowanych. Porównanie cech betonu zwykłego i kompozytu o nazwie Ductal zamieszczono w tabeli 3.

## Nowe generacje stalowego zbrojenia do betonu

Większość stosowanych dotąd w kraju gatunków stali zbrojeniowej do konstrukcji żelbetowych (pręty i siatki zbrojeniowe) została praktycznie wycofana z rynku z uwagi na postanowienia normy europejskiej PN-EN 1992-1-1:2008 [3], która wymaga stosowania stali o granicy plastyczności w przedziale 400-600 MPa. Wymaganiom tym odpowiadają spawalne stale gatunku RB400W i RB500 oraz stal o znaku EPSTAL, gat. B500SP. Wymienione stale spełniają klasyfikację Eurokodu 2 w zakresie ciągliwości wyrażonej za pomocą parametru  $k$  określanego według wzoru:

$$k = f_{tk} / f_{yk}$$

gdzie  $f_{tk}$  – charakterystyczna wytrzymałość stali na rozciąganie  
 $f_{yk}$  – charakterystyczna granica plastyczności

Wymagania w zakresie ciągliwości i granicznych odkształceń dla nowych gatunków stali prętowej do żelbetu zestawiono w tabeli 4.

## Niemetaliczne zbrojenie prętowe do konstrukcji betonowych

Z uwagi na brak odporności zbrojenia stalowego na korozję prowadzi się poszukiwania alternatywnego zbrojenia niemetalicznego. Od lat znane są rozwiązania prętów wytwarzanych z włókien węglowych (CFRP), szklanych (GFRP) i aramidowych (AFRP) [5].

Niedawno opracowano także technologię wytwarzania prętów zbrojeniowych jako kompozytu bazytowego (BFRP) wytwarzanego metodą pultruzji. Wykazują one wiele zalet w porównaniu z konwencjonalnymi prętami stalowymi, jak również z prętami typu CFRP i GFRP [6]. Pręty te

Tabela 1. Charakterystyka wytrzymałościowa betonów nowej generacji.

Nazewnictwo polskie	Nazewnictwo angielskie	Wytrzymałość na ściskanie
Beton wysokowartościowy	High Performance Concrete	$f_{ck} > 50$ MPa
Beton bardzo wysokowartościowy	Very High Performance Concrete	$f_{ck} = 100-150$ MPa
Beton ultra wysokowartościowy	Ultra High Performance Concrete	$f_{ck} > 150$ MPa
Wysokowartościowy fibrobeton	High Performance Fibroconcrete	$f_{ck} > 50$ MPa

Tabela 2. Porównanie właściwości włókien stosowanych w fibrobetonach (4).

Parametry		włókna stalowe	włókna polimerowe	włókna bazaltowe	włókna szklane
Gęstość	t/mm <sup>3</sup>	7,8	0,9-1,4	1,7-2,65	1,8-2,6
Długość	mm	8-60	6-54	24-54	4-40
Średnica	μ	20-40	12-34	12-18	13-20
Moduł Younga	GPa	190-210	35-40	70-90	60-70
Wytrzymałość na rozciąganie	MPa	550-1100	480-1320	700-1680	410-1180
Wydłużenie przy zerwaniu	%	-	2,0-4,0	0,5-1,6	3,7-4,5
Odporność na korozję	-	NIE	TAK	TAK	NIE
Odporność ogniowa	°C	bardzo wysoka do 1600 °C	słaba do 150-165 °C	bardzo wysoka do 1650 °C	dobra 700 °C
Temperatura robocza	°C	-50 do +300	-20 do +120	-260 do +750	-100 do +400
Twardość	Skala Moshha	9	1-3	8,5	5-7
Zawartość włókien	%	0,5-3,0	0,5-2,0	-	-
Przyczepność do betonu	-	bardzo dobra	słaba	bardzo dobra	dobra

Tabela 3. Porównanie cech betonu zwykłego i fibro kompozytu DUCTAL.

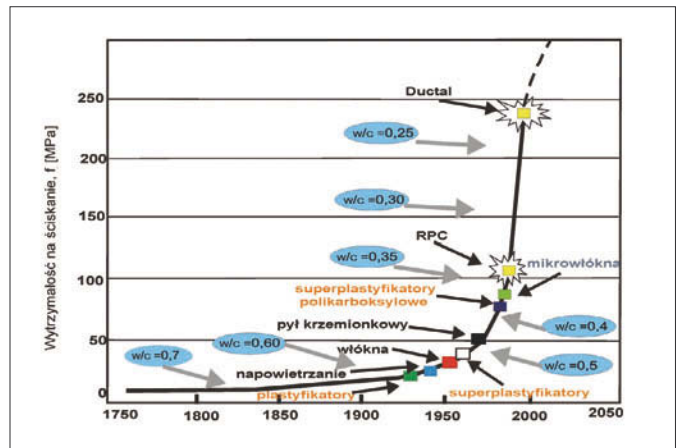
Właściwość	Beton zwykły	DUCTAL
Wytrzymałość na ściskanie	15-60 MPa	180-220 MPa
Wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu	2-8 MPa	36-45 MPa
Moduł sprężystości	20-40 GPa	55-60 GPa
Gęstość	2,2-2,5 kg/dm <sup>3</sup>	2,45-2,55kg/dm <sup>2</sup>

Tabela 4. Klasy nowoczesnych gatunków stali zbrojeniowej wg EC2 (3)

Właściwość zbrojenia	Klasy stali dla prętów prostych		
	A	B	C
Minimalna wartość ciągliwości	$k \geq 1,05$	$k \geq 1,08$	$1,15 \leq k < 1,35$
Charakterystyczne odkształcenie przy rozciąganiu $\epsilon_{uk}$ [%]	$\epsilon_{uk} \geq 2,5$	$\epsilon_{uk} \geq 5,0$	$\epsilon_{uk} \geq 7,5$
Gatunki stali produkowanych w kraju spełniające podane kryteria	St3SY-b-500	RB 500W Bst500S	B500SP (EPSTAL)

przy takiej samej średnicy wykazują znacznie (ponad dwukrotnie) wyższą wytrzymałość na rozciąganie w porównaniu do zbrojenia ze stali lub z włókna szklanego GFRP. Pręty BFRP są o 89% lżejsze niż pręty ze stali zbrojeniowej; tona bazaltowych prętów zbrojeniowych zastępuje zbrojenie 9,6 ton stali zbrojeniowej. Mała waga BFRP pozwala na znacznie szybsze konstruowanie i montaż zbrojenia. Pręty BFRP mają taki sam współczynnik rozszerzalności cieplnej jak beton i stal.

Włókna bazaltowe, w przeciwieństwie do włókien szklanych, nie wchłaniają i nie przekazują wilgoci. Poza tym wystające włókna nie two-



Rys. 1. Uogólniona krzywa rozwoju technologii betonów modyfikowanych (2)



Rys. 2. Pręty niemetaliczne zbrojenia konstrukcyjnego: a) z włókien bazaltowych BFRP, b) z włókien szklanych GFRP

rzą ścieżek dla wody, która mogłaby penetrować i niszczyć beton. Ponadto pręty BFRP nie przewodzą prądu, co zapobiega elektrolizie w zastosowaniach konstrukcji narażonych na oddziaływanie wody morskiej.

Pręty BFRP są niemagnetyczne i nie indukują pola magnetycznego pod wpływem ekspozycji na pole elektromagnetyczne lub na energię częstotliwości radiowej (RF). Dlatego mogą być stosowane w pomieszczeniach z rezonansem magnetycznym (MRI) i w pobliżu czynniki identyfikacji radiowej (RFID).

Pręty bazaltowe mogą być stosowane w szerokim zakresie temperatur. Mimo zawartości żywic w prętach BFRP ich graniczny zakres temperatur pracy wynosi od -70°C do +100°C, a zatem są one przydatne w zastosowaniach, które wymagają odporności na ogień. Pręty BFRP mają także niską przewodność cieplną, są niepalne i nie wydzielają żadnych szkodliwych substancji podczas pożaru. Pręty BFRP mogą być łatwo przecinane przy pomocy typowych narzędzi.

W porównaniu do prętów ze stali pręty BFRP mają niższy moduł sprężystości. Ugięcie belki czy płyty będzie zatem ograniczeniem zastosowania. Kiedy w belce zostanie przekroczona granica nośności na zginanie prętów BFRP, nastąpi zerwanie takich prętów. Z praktycznego punktu widzenia w odpowiednio zaprojektowanej belce granica nośności na zginanie będzie znacznie wyższa niż granica nośności ze względu na pojawienie się rys w betonie, zatem przy projektowaniu należy uwzględnić niższy moduł prętów BFRP [7].

#### Literatura:

- [1] Ashby M. F., Jones D. R. Y., Materiały Inżynierskie. Wydawn. Naukowo-Techniczne. Warszawa, 1996, s. 472.
- [2] Zarnecki L., Domieszki do betonu – Możliwości i ograniczenia. Cement Polski: Budownictwo, Technologie, Architektura. 2003, s. 4-6.
- [3] PN-EN 1992-1-1:2008. Eurokod 2. Projektowanie konstrukcji z betonu. Warszawa, 2008.
- [4] Krassowska J., Łapko A.: Przydatność stosowania nowoczesnych kompozytów fibrobetonowych w konstrukcjach budowlanych. „Budownictwo i Inżynieria Środowiska”, Vol. 2/2011, nr 1, s. 41-46.
- [5] FRP Reinforcement in RC Structures. Fib Bulletin 40, 2007.
- [6] Wu Zhishe at al: Advanced of Structural Safety and sustainability with Basalt Fiber Reinforced Polymers. Proceedings of CiCE 2012.
- [7] Łapko A. Urbański M., Problemy badania betonowych elementów zginanych zbrojonymi prętami bazaltowymi, „Materiały Budowlane”, nr 3/2013, s. 40-41.

Fot. arch. autora