

dr inż. Marzena Kurpińska^{1*)}
mgr inż. Aleksandra Mariak¹⁾

Włókna polimerowe jako alternatywa włókien stalowych stosowanych w betonie

Polymer fiber reinforced concrete as an alternative to steel fiber

DOI: 10.15199/33.2016.02.

Streszczenie. Betony ze zbrojeniem strukturalnym należą do materiałów kompozytowych. Obecność włókien zwiększa wytrzymałość na rozciąganie i rozciąganie przy zginaniu, udarność, a także zapobiega powstawaniu mikrorys i spękań. W artykule omówiono podstawowe parametry włókien stalowych i makrowłókien polimerowych oraz ich wpływ na właściwości dojrzewającego i stwardniałego betonu. Szczególną uwagę zwrócono na zalety makrowłókien polimerowych w stosunku do włókien stalowych. Włókna syntetyczne znajdują zastosowanie przy budowie obiektów, w przypadku których istotne będzie ograniczenie spękań skurczowych, duża odporność na udarność, korozję i wysoką temperaturę. Fibrobetony coraz częściej stanowią istotny element przyjętych rozwiązań konstrukcyjnych.

Słowa kluczowe: fibrobeton, beton kompozytowy, makrowłókna polimerowe, włókna stalowe.

Abstract. Fiber reinforced concrete belongs to a group of composite materials and is characterized by special properties. The presence of fibers increases the tensile strength, flexural strength, impact strength and also prevents the formation of microcracks and cracks. The paper discusses the basic parameters of steel and polymer fibers and the impact of both types of fibers on the properties of maturing and hardened concrete. Particular attention was paid to the advantages of polymer fibers in relation to the well-known steel fibers. The synthetic fibers undoubtedly will be applied in the construction of buildings where the reduction of shrinkage cracking as well as corrosion resistance and fire temperatures are an essential element of the adopted design solutions.

Keywords: fiber reinforced concrete, polymer fibers, steel fibers.

Fibrobeton to materiał kompozytowy złożony z cementu, kruszywa grubego, kruszywa drobnego, wody, domieszek chemicznych, dodatków i włókien. Łączna długość włókien w 1 m³ betonu wynosi od kilku do kilkunastu kilometrów. Do najbardziej popularnych należą włókna stalowe, jednakże coraz częściej zastępuje się je makrowłóknami polimerowymi. Fibrobetony w porównaniu z betonem zwykłym charakteryzują się zwiększoną wytrzymałością na rozciąganie przy zginaniu oraz na rozciąganie, odpornością na zarysowania, pęknięcia czy uderzenia [2, 4, 5]. Oba typy włókien mają odmiennie cechy, a wybór właściwego zbrojenia rozproszonego zależy od przeznaczenia mieszanki i miejsca wbudowania. Właściwości fizyczne i mechaniczne makrowłókien polimerowych podano w tabeli 1. Wymagania dotyczące włókien zawarte są w normach PN-EN 14889-1:2007 oraz PN-EN 14889-2:2007.

Podstawowe parametry włókien wpływające na właściwości fibrobetonu to: długość, średnica, wytrzymałość na rozciąganie oraz geometria. Niezwykle istotny jest także stosunek długości włókna *l* do jego średnicy *d*

Tabela 1. Właściwości fizyczne i mechaniczne [8]

Table 1. Physical and mechanical properties [8]

Parametry	Włókna stalowe						Makrowłókna polimerowe	
	35	35	50	50	60	60	54	38
Długość [mm]	35	35	50	50	60	60	54	38
Średnica [mm]	0,7	1,0	0,6	1,0	0,75	1,0	0,45	0,45
Wytrzymałość na rozciąganie [MPa]	1050	1050	1050	1050	1050	1050	650 – 750	650 – 750
Smukłość <i>l/d</i>	50	35	83	50	80	60	120	84
Liczba [szt./kg]	9300	4500	8900	3200	4600	2700	110 000	156 000
Długość sumaryczna [m/kg]	325	158	445	160	276	162	5 940	5 928
Dozowanie [kg/m ³]	25	25	25	25	25	25	2	2
Długość sumaryczna zbrojenia [m]	8125	3950	11 125	4000	6900	4050	11 880	11 825

określany mianem smukłości. Makrowłókna polimerowe dzieli się na dwie klasy. Klasa I, to włókna grubości < 3 mm, a do klasy II zalicza się włókna, których grubość jest większa niż 3mm. Producent deklaruje rodzaj polimeru, wymiary, wytrzymałość na zrywanie włókien klasy I i wytrzymałość na rozciąganie włókien klasy II, a także temperaturę topnienia i temperaturę zapłonu. W przypadku włókien stalowych powinny być określone wymiary oraz właściwości materiału, z którego zostały wyprodukowane – wytrzymałość na rozciąganie, moduł sprężystości i wartości ciągliwości. Istotą dodatku włókien do matrycy cementowej jest ich siła zakotwienia, dlatego też bardzo często stosuje się włókna o odkształconych końcówkach. Wytrzymałość na rozciąganie haczykowa-

tych włókien stalowych jest bardzo duża w porównaniu z wytrzymałością na rozciąganie betonu. W zasadzie wszelkie niepowodzenia nie są spowodowane pęknięciem włókien, lecz ich niewystarczającą przyczepnością do betonu. Ten problem nie występuje w przypadku włókien polimerowych. Możliwość przejmowania obciążeń przez tego typu włókna zależy od ich ilości w objętości betonu, stopnia rozproszenia w matrycy cementowej oraz stosunku powierzchni styku do przekroju włókna. Większa powierzchnia włókna polepsza przyczepność, a zatem powierzchnia włókien polimerowych oraz specjalny kształt będą miały wpływ na trwałość i wytrzymałość betonu. Szczególnie korzystny efekt uzyskuje się w przypadku włókien zwanych skrętka.

¹⁾ Politechnika Gdańska, Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska

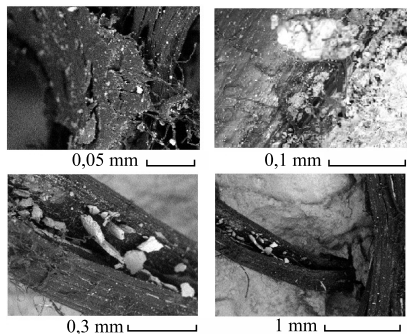
^{*)} Autor do korespondencji:
e-mail: marzena.kurpinska@pg.gda.pl

Efektywność włókien polimerowych w porównaniu z włóknami stalowymi jest następująca:

- makrowłókna polimerowe o długości 54 mm i wytrzymałości na rozciąganie $R_m > 650$ MPa – dozowane w ilości 2,0 kg/m³ betonu (długość sumaryczna zbrojenia wynosi: 2,0 kg x 110 000 szt/kg x 0,054 m = 11 880 m/m³);

- makrowłókna stalowe 50/1.0 o wytrzymałości na rozciąganie $R_m > 1050 - 1100$ MPa – dozowane w ilości 20 kg/m³ betonu (długość sumaryczna zbrojenia wynosi: 20 kg x 3200 szt/kg x 0,05 m = 3 200 m/m³).

Z obliczeń wynika, że efektywność zbrojenia włóknami polimerowymi jest zdecydowanie większa niż włóknami stalowymi 50/1.0. Badania mikrostruktury przeprowadzone pod mikroskopem Hitachi Tabletop Microscope TM3030 pozwalają uzyskać rzeczywisty obraz ułożenia włókien w ponad 2500-krotnym powiększeniu (fotografia 1). Wynika z nich, że włóknista budowa makrowłókien polimerowych umożliwia doskonałą przyczepność do betonu, co jest istotą fibrobetonów.



Fot. 1. Mikrostruktura fibrobetonu – kryształki zaczynu wnikające pomiędzy makrowłókna polimerowe [Fot. Autorki]

Photo 1. Fiber reinforced concrete under the microscope (macropolymer fibers) [Phot. Authors]

Wpływ włókien na właściwości betonu

Projektując mieszankę z włóknami, należy zwrócić szczególną uwagę na jej urabialność oraz jednorodność rozprowadzenia włókien w betonie. Określa się wpływ włókien stalowych oraz makropolimerowych klasy II. Badania porównawcze należy wykonać wg PN-EN 14845:2007. Procentowy udział zawartości włókien stalowych w kompozycie fibrobetonowym wynosi zazwyczaj 0,5 ÷ 3% jego objętości. W przypadku dodania włókien w ilości powyżej 2% może dojść do powstania tzw. jeży, czyli zbitych kul włókien, które tworzą się podczas mieszania składników. Konieczna jest wówczas modyfikacja składu mie-

szanki betonowej w celu zapewnienia właściwego rozprowadzenia włókien i optymalizacji konsystencji ze szczególnym uwzględnieniem transportu. Z kolei dodatek włókien poniżej 0,5% nie powoduje zauważalnych zmian cech mechanicznych modyfikowanego betonu [6].

Zalecane dozowanie włókien stalowych to 25 – 30 kg na 1 m³ betonu, natomiast polimerowych 2 – 5,5 kg. Różnica gęstości tych włókien (odpowiednio 7850 kg/m³ i 910 kg/m³) oznacza ponad 8-krotną różnicę dozowania masowego do mieszanki betonowej. Zakładając średnie dozowanie włókien stalowych w ilości 25 kg/m³, a polimerowych 3 kg/m³, na 1200 m³ betonu na posadzkę przemysłową należałoby zastosować 30 t włókien stalowych i zaledwie 3,6 t polimerowych.

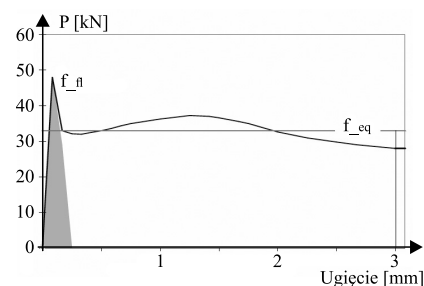
Dozowanie włókien stalowych do mieszanki betonowej jest dość trudne. Zazwyczaj stosuje się do tego celu specjalne urządzenia wdmuchujące bezpośrednio do mieszalnika wytwórni betonu lub do betonowozu. W przypadku dozowania włókien polimerowych prace są znacznie łatwiejsze, ponieważ włókna polimerowe często są pakowane w rozpuszczalne worki celulozowe o masie 1 kg i w efekcie dozowanie włókien odbywa się ręcznie do betonowozu. Mniejsza ilość włókien polimerowych wpływa także na polepszenie urabialności i układania mieszanki, ograniczenie powstawania „jeży”, a w konsekwencji zmniejsza się ilość odpadów.

Definicja wytrzymałości materiału jednorodnego i sprężystego nie pozwala na pełny opis właściwości materiału kompozytowego, a tym samym ogranicza wykorzystanie fibrobetonu w budownictwie. Wprowadzenie pojęcia równoważnej wytrzymałości pozwala przedstawić charakterystykę fibrobetonu w zakresie odkształceń pozasprężystych, co ma istotne znaczenie przy wymiarowaniu grubości posadzek na podłożu gruntowym [3]. W celu wyznaczenia wytrzymałości równoważnej f_{eq} należy wykonać badania na zginanie na próbkach o wymiarach 150 x 150 x 500 mm zgodnie z normą JCI SF-4. Na podstawie wykresu siły zginającej w funkcji ugięcia (rysunek 1) określa się równoważną wytrzymałość na zginanie f_{eq} , zdefiniowaną wzorem:

$$f_{eq} = (T_b / \delta_{L/150}) \cdot (L / bh^2) \quad [3]$$

gdzie:

T_b – praca zginania określona na podstawie pola powierzchni pod wykresem, mierzonego do ugięcia $\delta_{L/150}$ (= L/150);
 b i h – wymiary przekroju poprzecznego belki;
 L – rozpiętość belki.



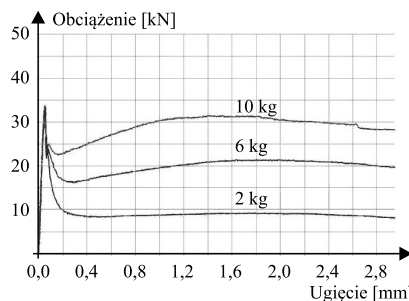
Rys. 1. Badanie wytrzymałości równoważnej na zginanie: obciążenie – ugięcie [3]
 Fig. 1. Strength equivalent test: flexural load – deflection [3]

W badaniu określa się także wytrzymałość betonu na rozciąganie przy zginaniu f_{ft} . Dodatkowo wprowadza się bezwymiarowy wskaźnik wytrzymałości równoważnej: $R_e = f_{eq} / f_{ft}$ [3]. Przykład badania wytrzymałości równoważnej na zginanie w przypadku różnej zawartości makrowłókien polimerowych (tabela 2) przedstawiono na rysunku 2. Kolejnym badaniem jest określenie wielkości rozwarcia szczeliny dla SGU i SGN. Testy na zginanie przeprowadza się na próbkach pryzmatycznych z nacięciem w środku rozpiętości. Podczas obciążania rejestruje się rozwarcie krawędzi naciętej szczeliny (CMOD – ang. crack mouth opening displacement) i na podstawie wykresu σ -CMOD (rysunek 3) oblicza wytrzyma-

Tabela 2. Wytrzymałość betonu w zależności od zawartości włókien [8]

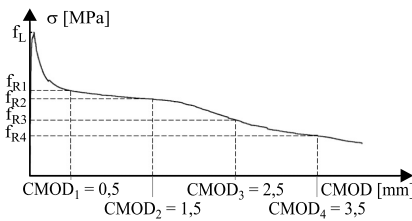
Table 2. Concrete strength due to content of fiber [8]

Charakterystyka	Zawartość makrowłókien polimerowych [kg]		
	2	6	10
Wytrzymałość betonu na rozciąganie przy zginaniu f_{ft} [MPa]	4,3	4,5	4,4
Wytrzymałość równoważna betonu na zginanie f_{eq} [MPa] Mesh	1,3	2,9	3,9
Wskaźnik wytrzymałości równoważnej R_e [%]	30	65	89



Rys. 2. Badanie wytrzymałości równoważnej na zginanie w przypadku różnej zawartości makrowłókien polimerowych [8]

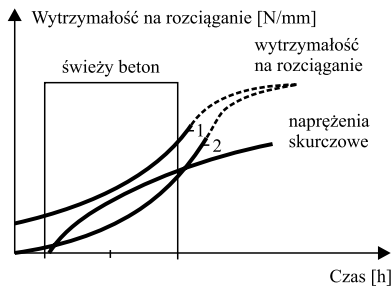
Fig. 2. Strength equivalent test for different content of macrofibers [8]



Rys. 3. Schematyczny wykres naprężenie rozciągające – rozwarście krawędzi szczeliny CMOD przy badaniu wytrzymałości resztkowej na zginanie wg PN-EN 14651 [7]
Fig. 3. Schematic diagram of tensile stress – crack mouth opening displacement (CMOD) according to EN 14651 [7]

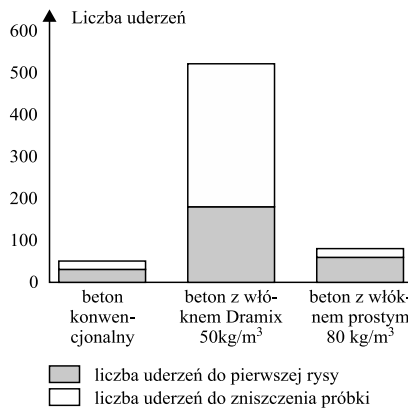
łość resztkową na zginanie f_{R1k} dla $CMOD = 0,5$ mm i f_{R3k} dla $CMOD = 2,5$ mm [3].

Moduł sprężystości materiału syntetycznego wynosi 5 – 10 GPa i jest stosunkowo mały w porównaniu z modułem Younga włókien stalowych (210 GPa) czy betonu (25 – 40 GPa). Na rysunku 4 przedstawiono wyniki rozciągania próbki betonowej bez i z dodatkiem włókna polimerowego. W początkowym okresie dojrzewania betonu naprężenia skurczowe przekraczają wytrzymałość młodego betonu zwykłego, co prowadzi do powstania mikrorys i pęknięć skurczowych już na etapie tworzenia struktury. Dodatek włókien polimerowych skutecznie zwiększa wytrzymałość na rozciąganie, zatrzymuje powstawanie naturalnych spękań skurczowych, a tym samym pozwala na rezygnację z tzw. zbrojenia przeciwskurczowego w postaci siatek stalowych.



1 – beton z włóknami polipropylenowymi M 20/1,7
2 – beton bez włókien
Rys. 4. Wyniki rozciągania próbki betonowej w funkcji czasu [5]
Fig. 4. Effect of polymer fibers versus time [5]

Amerykański Instytut Betonu (ACI) jako miarę udarności określa liczbę uderzeń do osiągnięcia wskazanego stanu zarysowania lub uszkodzenia próbki wykonanej z betonu kompozytowego. Odporność fibrobetonu na uderzenia zależy od rodzaju i zawartości włókien w mieszance betonowej. Wraz ze wzrostem zawartości włókien zwiększa się liczba uderzeń wywołująca stan zarysowania, a następnie zniszczenie (rysunek 5). Wpływ makrowłókien syntetycznych jest porównywalny z efektami włókien stalowych.



Rys. 5. Wpływ zawartości włókien stalowych na udarność fibrobetonu [5]
Fig. 5. Influence of steel fibers on the impact strength [5]

Dodatkową zaletą włókien syntetycznych jest bardzo duża odporność na utlenianie i korozję spowodowaną czynnikami fizycznymi oraz chemicznymi. Dzięki wymienionym cechom beton zbrojony makrowłóknami znajduje zastosowanie w środowisku wilgotnym i agresywnym (koryta, baseny, studnie, zbiorniki, ściany oporowe, falochrony, nabrzeża). Mieszanki z ich dodatkiem nadają się do wylewania, tłoczenia lub natryskiwania. Stosowanie ich nie wymaga wprowadzania zmian w technologii betonu. W przypadku posadzek parkingów, gdzie koła pojazdów wrywają włókna stalowe, prowadząc tym samym do rozwoju korozji (fotografia 2), korzystniejsze są włókna polimerowe, które będą ulegały ścieraniu, a nie wrywaniu.

Oddziaływanie wysokiej temperatury pożarowej na beton powoduje niszczenie jego struktury, spadek wytrzymałości, a także odpryskiwanie fragmentów (ang. *thermal spalling*) z dużą prędkością, co jest niebezpieczne zarówno dla ekip ratowniczych, jak i użytkowników tuneli. Korzystnym rozwiązaniem jest więc stosowanie betonu zbrojonego włóknami polimerowymi (PP). Ich dodatek wpływa na wzrost odporności betonu na spalling. W temperaturze 360 °C włókna ulegają całkowitej degradacji. Powstałe po nich



Fot. 2. Uszkodzona posadzka parkingowa na skutek korozji
[Fot. Autorki]
Photo 2. Damaged floor parking due to corrosion
[Phot. Authors]

puszki tworzą kanaliki powietrzne, które podwyższają porowatość betonu i ułatwiają szybkie odparowanie pary wodnej, dzięki czemu dochodzi do obniżenia ciśnienia wewnętrznego rozpieńającego beton i ograniczenia zjawiska spallingu [1].

Wnioski

Rozproszone zbrojenie polimerowe pod wieloma względami przewyższa zbrojenie w postaci włókien stalowych. Włókien polimerowych dozuje się masowo ok. 8-krotnie mniej niż tradycyjnych włókien stalowych, co pozwala na zmniejszenie nakładów pracy, wygodne dozowanie i mieszanie oraz obniżenie kosztów transportu. Istotne jest przeciwskurczowe działanie włókien polimerowych i możliwość redukcji naprężeń skurczowych na etapie twardnienia mieszanki. W przypadku włókien stalowych współpraca z matrycą ujawnia się w późniejszym okresie twardnienia, co wymaga zastosowania dodatkowo mikrowłókien polipropylenowych zapobiegających skurczowi plastycznemu. Zaletą włókien makropolimerowych jest odporność na zmienne warunki pogodowe, korozję i duża odporność ogniowa. Fibrobeton zbrojony włóknami polimerowymi znajduje zastosowanie przy wykonywaniu monolitycznych wylewek na podłożu naturalnym, posadzek przemysłowych i mieszkaniowych, nawierzchni drogowych i lotniskowych, elementów prefabrykowanych oraz jako beton natryskowy. Wykorzystując zwiększoną energię zginania fibrobetonu, możliwe jest także zmniejszenie grubości projektowanych elementów.

Literatura

- [1] Bednarek Zoja, Tomasz Drzymała. 2013. „Analiza wpływu wysokiej temperatury na zmianę parametrów wytrzymałościowych fibrobetonu z dodatkiem włókien polipropylenowych”. Zeszyty Naukowe SGSP 47 (3): 127 – 138.
- [2] Brandt Andrzej M. 2009. „Cement Based Composites: Materials, Mechanical Properties and Performance”. Taylor and Francis Group 1-535.
- [3] Glinicki Michał A. 2008. „Wytrzymałość równoważna fibrobetonu na zginanie”. Inżynier Budownictwa 47 (1): 50 – 51. PL ISSN 1732-3428.
- [4] Glinicki Michał A., Agnieszka Litorowicz, Marek Zieliński. 2002. „Badanie odporności fibrobetonów na pęknięcie przy zginaniu”. Materiały Budowlane (3): 74 – 76.
- [5] Jasiczak Józef, Paweł Mikołajczak. 2003. „Technologia betonu modyfikowanego domieszkami i dodatkami”. Wydawnicza Politechniki Poznańskiej. Poznań.
- [6] Katzer Jacek. 2010. „Kształtowanie właściwości wybranych fibrokompozytów cementowych”. Oficyna Wydawnicza Politechniki Białostockiej. Białystok.
- [7] PN- EN 14651. 2005. Metoda badania betonu zbrojonego włóknem stalowym. Pomiary wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu (granica proporcjonalności LOP).
- [8] <http://www.astro-polska.com>.

Przyjęto do druku: 28.09.2015 r.