

*Tomasz Ponikiewski
Jan Koziół
Grzegorz Cygan
Jerzy Wrona
Krzysztof Wrzecion*

Wpływ makro-włókien syntetycznych na wybrane właściwości BSZ

THE INFLUENCE OF SYNTHETIC MACRO-FIBRES ON THE SELECTED
CHARACTERISTIC OF SCC

Streszczenie

W artykule przedstawiono wpływ dodatku makro-włókien syntetycznych na wybrane właściwości mechaniczne fibrobetonów samozagęszczonych. Określono wpływ włókien na wytrzymałość na ściskanie, rozciąganie przy zginaniu i energię zniszczenia. Badania wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu i energii zniszczenia wykonywane były na belkach o wymiarach 600x150x150 mm.

Do określenia wpływu włókien na wytrzymałość na ściskanie użyto próbek sześciennych o boku 150 mm. Wspomniane wyżej elementy wykonywane były z mieszanek betonu samozagęszczalnego, o zmiennej zawartości superplastyfikatora tak by zniwelować utratę urabialności spowodowaną zwiększającą się ilością włókien. Włókna o długości 42 mm dodawano do mieszanki w ilości 1; 2; 2,5; 3,0; 3,5; 4,0 i 4,5 kg/m³.

Abstract

The aim of the present work is to investigate the selected behavior (compressive and flexural tensile strength, fracture energy) of self-compacting concrete reinforced with synthetic macro-fibres. The goal of this work was to determine the mechanical properties of self-compacting concrete with polymer fibres, cast in beams (600x150x150 mm) and compressive strength by 150 mm specimens. The paper presents the laboratory investiga-

dr hab. inż. Tomasz Ponikiewski – Politechnika Śląska, Wydział Budownictwa

mgr inż. Jan Koziół – Politechnika Śląska, Wydział Budownictwa

mgr inż. Grzegorz Cygan – Politechnika Śląska, Wydział Budownictwa

mgr inż. Jerzy Wrona – Mapei Polska

mgr inż. Krzysztof Wrzecion – Mapei Polska

tions of SCC reinforced with seven volume ratios (1.0-2.0-2.5-3.0-3.5-4.0-4.5 kg/m³) of 42 mm long polymer fibres and different dosage of superplasticizers to keep workability.

1. Wprowadzenie

Obecnie na rynku istnieje wiele firm, zajmujących się produkcją włókien do betonu. Włókna wytwarzane są z różnych materiałów, w wielu różnych kształtach i rozmiarach. Pierwszym podstawowym mechanizmem oddziaływania zbrojenia rozproszonego w betonie, jest zmniejszenie odkształceń skurczowych matrycy cementowej i niedopuszczenie do tworzenia się rys i pęknięć. Jeżeli włókna mają dobrą przyczepność do matrycy, to skurcz plastyczny w okolicy włókien może zostać znacznie ograniczony, a efekt jest zależny od ilości zastosowanych włókien. Drugim ważnym mechanizmem oddziaływania zbrojenia rozproszonego jest poprawa charakterystyk wytrzymałościowych stwardniałego betonu. Efekt ten jest zależny w dużej mierze od rodzaju włókien, ich wytrzymałości, modułu sprężystości oraz zakotwienia w matrycy betonowej. Z chwilą nastąpienia lokalnego zarysowania przekroju betonowego wzmocnionego włóknami, najczęściej poprzez wyczerpanie wytrzymałości na rozciąganie zaczynu cementowego, kompozyt ulega dalszemu odkształcaniu, nadal utrzymując nośność. Naprężenia zostają przejęte przez włókna „przechodzące” przez powstałą rysę. Do całkowitego zniszczenia elementu dochodzi dopiero w momencie zerwania włókien lub ich wysnuć z matrycy.

Technologia betonów samozagęszczalnych modyfikowanych zróżnicowanymi materiałowo włóknami jest aktualnie przedmiotem bardzo dużego zainteresowania badawczego. Istniejący stan wiedzy w zakresie samozagęszczalnych betonów modyfikowanych syntetycznymi makro-włóknami różnego rodzaju jest dość ograniczony. Dostępne publikacje z badań takich betonów, szczególnie pod względem projektowania i metod formowania są nieliczne [1, 2, 3].

2. Założenia i metodyka badań

Celem badań było określenie wpływu polimerowych włókien strukturalnych na wybrane właściwości mechaniczne stwardniałego betonu samozagęszczalnego. Badania polegały na stopniowym zwiększaniu udziału włókien polimerowych Mapefibre ST42 w składzie mieszanki betonowej. Ilość włókien mieściła się w granicach 0–4,5 kg/m³. Skład badanych mieszanek SCC przedstawiono w tabeli 1. Opis oraz przyjęte oznaczenia próbek wykonanych w ramach badań przedstawiono w tabeli 2. W ramach prac badano 7 mieszanek ze zmienną zawartością włókien polimerowych i zmienną zawartością domieszki upłynniającej. Ilość superplastyfikatora zawierała się w granicach 0,85 – 2,1% masy cementu, była podyktowana chęcią uzyskania względnie stałej wielkości rozplywu mieszanek o zwiększającej się zawartości włókien. Tym samym przedstawione niżej wyniki badań, przedstawiają wpływ ilości włókien na parametry mechaniczne fibrobetonów samozagęszczonych. Wpływ ten nie jest „zafałszowany” wpływem włókien na konsystencję mieszanek, a to nie wątpliwie miało by miejsce gdyby ilość superplastyfikatora była niezmienna. Tabela 2 przedstawia przyjęte oznaczenia dla poszczególnych zawartości włókien w składzie.

Uzyskanie miarodajnych i reprezentatywnych wyników wiąże się z zachowaniem dokładnie takiej samej procedury sporządzania mieszanki, od początku aż do końca prac badawczych, dla każdego sporządzanego i badanego zarobu. Zasadniczy czas mieszania, mierzony od momentu połączenia wody z cementem, wynosił 10 minut. Niniejszą procedurę przedstawiono poniżej:

- dozowanie składników suchych, kolejno: kruszywa grubego, cementu wraz z popiołem lotnym, piasku, włókien polimerowych.
- wstępne mieszanie przez 30 sekund.
- dozowanie wody wraz z superplastyfikatorem.
- mieszanie przez 10 minut

Powyższa procedura została przyjęta, aby w jak najlepszy sposób oddać warunki sporządzania mieszanki w warunkach przemysłowych, na węzłach betoniarskich. Wraz z programowym zakończeniem sporządzania mieszanki niezwłocznie rozpoczynano badanie konsystencji za pomocą testu rozplywu, po ich zakończeniu otoczono próbki do badań wytrzymałościowych. Podczas trwania badań temperatura otoczenia wynosiła średnio 18°C, natomiast wilgotność powietrza oscylowała w okolicy 38%.

Tabela 1. Skład i deklarowane parametry zaprojektowanej mieszanki BSZ

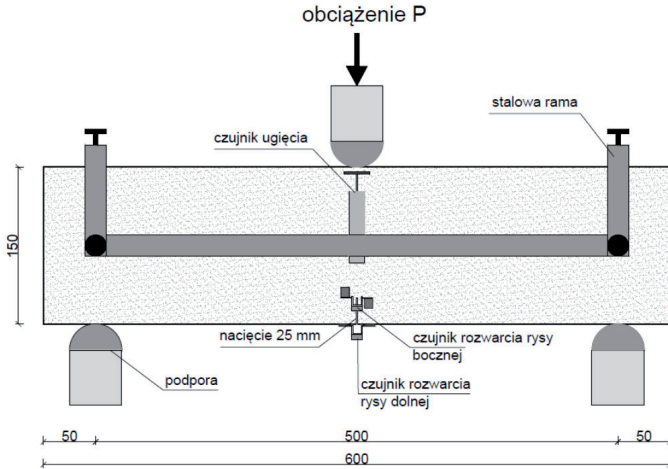
Składnik	kg/m ³
Cement CEM III/A 32,5N	350
Woda	171
Piasek 0–2 [mm]	698
Kruszywo frakcji 2–8 [mm]	532
Kruszywo frakcji 8–16 [mm]	432
Superplastyfikator MAPEI Dynamon NRG 1014 (0,85-2,1% m. c.)	2,98-7,35
Właściwość	
Klasa wytrzymałości	C30/37
Współczynnik w/c	0,49
Punkt piaskowy	44%
Klasa konsystencji (test rozplywu)	SF3 (rozplyw 760 mm - 850 mm)

Tabela 2. Oznaczenie składów oraz zawartości włókien polimerowych

Oznaczenia składu	B.0	B.01	B.1	B.2	B.3	B.4	B.5	B.6
Zawartość włókien [kg/m ³]	0	1.0	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5

Badanie wytrzymałości na ściskanie zostało przeprowadzone 28 dni po zaformowaniu, na próbkach sześciennych o wymiarze boku 150 mm, zgodnie z zapisami normy PN-EN 12390-3. Belki były poddane procedurze trójpunktowego zginania, w oparciu o zalecenia normy PN-EN 14651 [4] oraz instrukcji RILEM TC 162 [5]. Belki o wymiarach 150x150x600, nacięte i przygotowane do badania umieszczano w maszynie wytrzymałościowej, w której prędkość obciążania badanego elementu była kontrolowana przez przyrost jego odkształcenia. Na belkę nakładano stalową ramę, do której montowano czujniki ugięcia. Czujniki rozwarcia rysy bocznej i dolnej były montowane bezpośrednio do metalowych elementów przyklejonych do belki. Schemat ułożenia belki w maszynie oraz pozycje poszczególnych czujników przedstawiono na rysunku 1. Całość badania była zależna od zadanego przyrostu ugięcia belki, które zostało ustalone na stałą wartość równą 0,5 mm/min. Badanie trwało do osiągnięcia zakładanego ugięcia równego 5 mm. Maszyna rejestrowała siłę pierwszego pęknięcia oraz co 0,05 s poniższe wartości:

- aktualną wartość przyłożonej siły,
- ugięcie belki,
- rozwarcie rysy bocznej (CTOD),
- rozwarcie rysy dolnej (CMOD).



Rys. 1. Schemat badania belek

Wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu w zakresie prostej proporcjonalności liniowej można wyznaczyć według normy PN-EN 14651 [4], stosując poniższy wzór (1). Za siłę niszczącą należy uznać najwyższą wartość przyłożonej siły w zakresie ugięcia do 0,05 mm.

$$f_{ct,L} = \frac{3 \cdot P \cdot L}{2 \cdot b \cdot h_{sp}^2} \quad (1)$$

gdzie: $f_{ct,L}$ – wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu [MPa],
 P – siła niszcząca [N],
 L – rozpiętość belki (500mm),
 b – szerokość belki (150 mm),
 h_{sp} – wysokość belki pomniejszona o wysokość szczeliny (125 mm).

Wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu dla danej serii została podana jako średnia arytmetyczna wartości z badania trzech belek o tej samej zawartości włókien.

Wyznaczenie energii zniszczenia ma na celu możliwość syntetycznego porównania współpracy różnych rodzajów włókien z matrycą cementową. Jest definiowana przez tzw. pracę zginania, czyli pole powierzchni pod krzywą zależności siła-ugięcie, powstałej podczas badania wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu. W niniejszej pracy określono energię zniszczenia dla ugięcia belki wynoszącego $i_1=L/150=3,33$ mm oraz dla ugięcia wynoszącego $i_2=5$ mm.

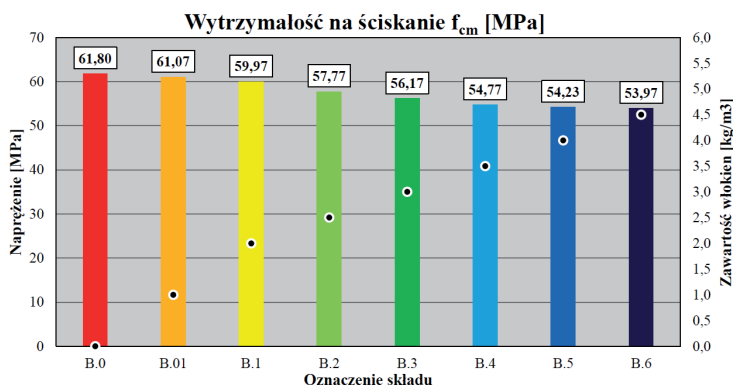
3. Wyniki badań i ich omówienie

3.1. Wyniki wytrzymałości na ściskanie $f_{c,28}$

W tabeli 3 przedstawiono komplet wyników badań wytrzymałości na ściskanie po 28 dniach zarówno dla pojedynczych próbek, jak i całych serii o tym samym poziomie zawartości włókien polimerowych w składzie. Wyniki zaprezentowano również na wykresie słupkowym (rys. 2). Jak można zauważyć, z otrzymanych wartości wytrzymałości wyłania się niemalże odwrotnie proporcjonalna zależność: im więcej włókien polimerowych w składzie, tym mniejsza jest wytrzymałość betonu na ściskanie. Przyczyn takiego stanu rzeczy oraz zauważalnej zależności należy szukać w różnicy wartości modułu sprężystości pomiędzy włóknami a matrycą betonową. Producent włókien, firma Mapei deklaruje, iż moduł sprężystości dla produktu Mapeifibre ST42 wynosi $E_1=3,9$ GPa. Dla klas betonu, do których zakwalifikowano badane populacje próbek, C45/55 oraz C40/50, moduł sprężystości wynosi odpowiednio $E_{cm,1}=38$ GPa i $E_{cm,2}=37$ GPa, zgodnie z tablicą 3.1 normy PN-EN 1992-1-1 [6]. Około dziesięciokrotnie wyższe moduły sprężystości dla badanego betonu w stosunku do modułu sprężystości włókien świadczą o tym, iż włókna nie współpracują z matrycą betonową i ograniczają przekrój rzeczywście ściskanego rdzenia próbki w czasie badania [7]. Należy również zauważyć, uzyskana klasa wytrzymałości betonu C45/55 dla składu B.0 (skład bazowy), wyznaczona zgodnie z [8] znacznie przewyższa klasę C30/37, deklarowaną przez firmę Mapei.

Tabela 3. Wyniki wytrzymałości na ściskanie

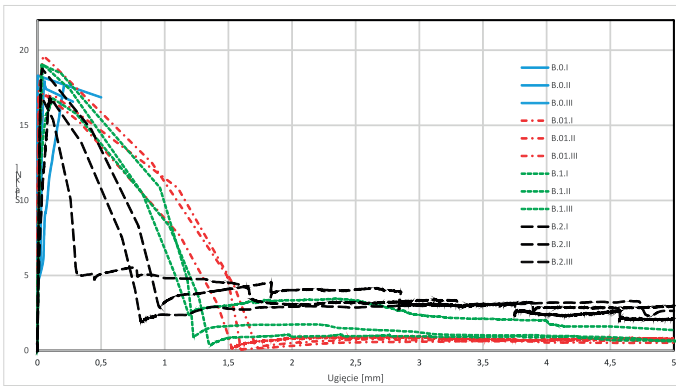
Oznaczenie	B.0	B.01	B.1	B.2	B.3	B.4	B.5	B.6	
Zaw. włókien [kg/m ³]	0	1	2	2,5	3	3,5	4	4,5	
Wytrzymałość na ściskanie $f_{c,28}$ [MPa]	I	61,3	60,1	61,9	58,5	58,7	54,4	55,8	53,7
	II	62,4	62,8	57,3	56	53,3	56,3	54,4	53,3
	III	61,7	60,3	60,7	58,8	56,5	53,6	52,5	54,9
Średnia wytrzymałość f_{cm} [MPa]	61,8	61,1	60,0	57,8	56,2	54,8	54,2	54,0	
Odniesienie do belki „świadka” [%]	100%	98,8%	97,0%	93,5%	90,9%	88,6%	87,8%	87,3%	
Klasa betonu	C45/55	C45/55	C45/55	C40/50	C40/50	C40/50	C40/50	C40/50	



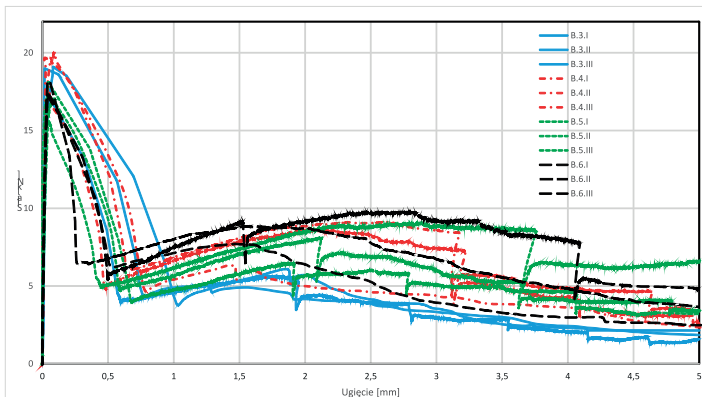
Rys. 2. Wytrzymałość na ściskanie w zależności od zawartości włókien

3.2. Wyniki badania wytrzymałości na zginanie przy rozciąganiu

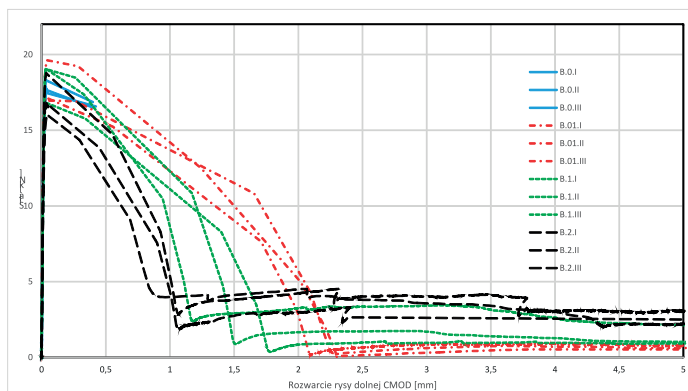
Podstawą, do wyznaczania wszelkich charakterystyk wytrzymałościowych dla badanych betonów, są wykresy siła-ugięcie (rys. 3 i 4) oraz siła – rozwarście rysy dolnej (CMOD) (rys. 5 i 6), uzyskane na podstawie danych rejestrowanych przez aparaturę badawczą. Wyjaśnić trzeba na samym początku, iż na przedstawione wyniki patrzeć należy z dużą dozą ostrożności i zrozumieniem zachowania maszyny wytrzymałościowej podczas obciążania belek. W przypadku belek o małej zawartości włókien lub całkowitym ich braku (B.01, B.1, B.2) zasugerować się można korzystnym przebiegiem wykresu siła-ugięcie i uznać, iż belka po zarysowaniu potrafi przenieść obciążenie większe, niż badane belki z dużo większą zawartością włókien. Wynika to z faktu, iż maszyna rejestruje wszystkie stany czujników oraz aktualnie przyłożoną siłę co 0,05 s i czas ten może być zbyt długi by uchwycić rzeczywiste zachowanie belki, która po wystąpieniu w przekroju siły powodującej zarysowanie skokowo ugina się, i w rzeczywistości przenosi bardzo niewielką siłę. Maszyna natomiast rejestruje siłę dużo wyższą, wynikającą z braku natychmiastowego „odpuszczenia” obciążenia i istniejącego jeszcze ciśnienia płynu hydraulicznego w instalacji. Można domniemywać, dla wszystkich badanych belek, moment przejścia naprężeń rozciągających w zarysowanym przekroju przez włókna, powinien następować w przedziale ugięcia nie dalej niż 0,5 mm do 0,75 mm.



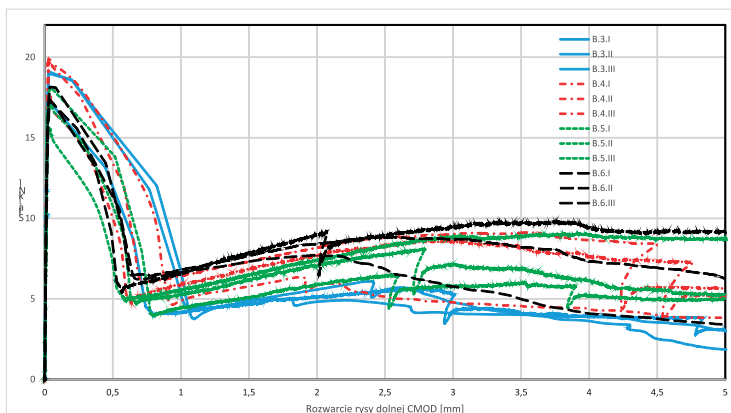
Rys. 3. Wykresy zależności siła-ugięcie dla belek B.0-B.2



Rys. 4. Wykresy zależności siła-ugięcie dla belek B.3-B.6



Rys. 5. Wykresy zależności siła-CMOD dla belek B.0-B.2



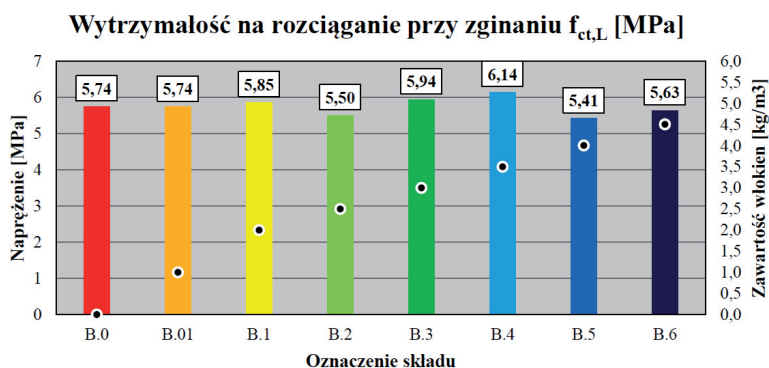
Rys. 6. Wykresy zależności siła-CMOD dla belek B.3-B.6

3.3. Wyniki badań wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu $f_{ct,L}$

W oparciu o wyniki badań zawarte w tabeli 4 oraz przedstawione na wykresie (rys. 7), można stwierdzić, iż wpływ włókien polimerowych, w przedziale badanych zawartości w składzie mieszanki, nie rzutuje na wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu w zakresie proporcjonalności liniowej. Uzyskane wyniki nie wykazują żadnego trendu, oscylują blisko wartości wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu uzyskanej dla belki „świadka” (skład B.0), czyli belki, w której składzie nie znalazły się włókna. Brak żadnego widocznego wpływu może wynikać z niskiego modułu sprężystości włókien, znacznie niższego od matrycy betonowej, o czym wspomniano już w analizie wyników wytrzymałości na ściskanie.

Tabela 4. Wyniki wytrzymałości rozciąganie przy zginaniu

Oznaczenie	B.0	B.01	B.1	B.2	B.3	B.4	B.5	B.6	
Zaw. włókien [kg/m ³]	0	1	2	2,5	3	3,5	4	4,5	
Wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu $f_{ct,L}$ [MPa]	I	5,65	5,50	5,37	5,35	5,62	6,40	4,99	5,55
	II	5,71	5,43	6,10	6,01	6,08	6,29	5,45	5,81
	III	5,86	6,28	6,09	5,13	6,11	5,74	5,79	5,54
Średnia wytrzymałość $f_{ct,L}$ [MPa]	5,74	5,74	5,85	5,50	5,94	6,14	5,41	5,63	
Odniesienie do belki „świadka” [%]	100%	99,9%	102,0%	95,8%	103,4%	107,0%	94,3%	98,1%	



Rys. 7. Wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu w zależności od zawartości włókien

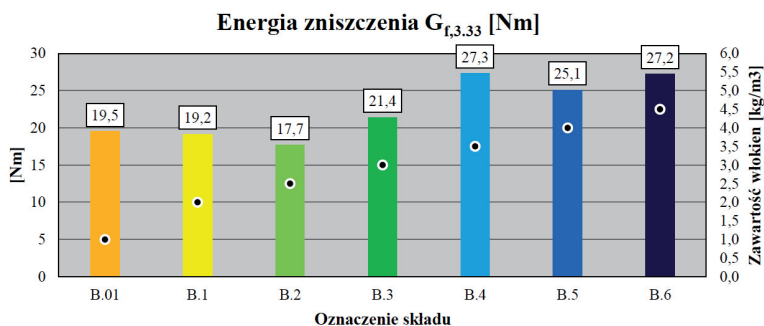
3.4. Wyniki badań energii zniszczenia $G_{f,i}$

W tabelach 5 i 6 przedstawiono wartości energii zniszczenia odpowiednio dla ugięcia równego 3,333 mm i ugięcia 5,0 mm. Analogicznie, na rysunkach 8 oraz 9 przedstawiono graficznie wartości energii zniszczenia w zależności od zawartości włókien polimerowych w składzie mieszanki.

W obu przypadkach zauważyć można wyraźny trend wzrostowy energii zniszczenia wraz ze wzrostem zawartości włókien. W przypadku wyników energii zniszczenia dla ugięcia 5,0 mm, dużo wyraźniejszy jest wzrost jej wartości wraz z ilością zbrojenia rozproszanego. Różnica pomiędzy składem B.01 a składem B.6 wynosi 70% wartości B.01. W przypadku energii zniszczenia dla ugięcia 3,333 mm ta różnica wynosi 39% wartości B.01. Wynika to przede wszystkim z większego znaczenia pracy włókien w kształtowaniu wartości energii zniszczenia, bez względu na potrzebną do zarysowania belki, co zaobserwować można na rysunkach 8 i 9.

Tabela 5. Wyniki energii zniszczenia dla ugięcia $\delta=3,33$ mm

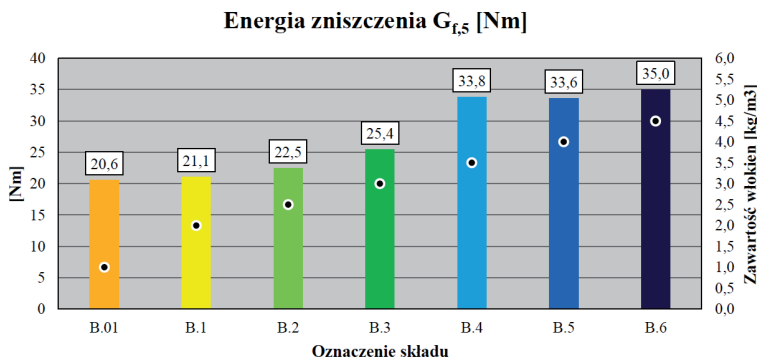
Oznaczenie		B.01	B.1	B.2	B.3	B.4	B.5	B.6
Zaw. włókien [kg/m ³]		1,0	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5
Energia zniszczenia $G_{f,3.333}$ [Nm]	I	17,4	16,8	16,1	18,9	31,1	27,0	30,8
	II	20,4	21,1	21,1	21,3	23,9	25,2	27,4
	III	20,7	19,5	15,9	24,0	27,1	23,1	23,5
Średnia energia zniszczenia $G_{f,3.333}$ [Nm]		19,5	19,2	17,7	21,4	27,3	25,1	27,2



Rys. 8. Energia zniszczenia przy ugięciu 3,33 mm w zależności od zawartości

Tabela 5. Wyniki energii zniszczenia dla ugięcia $\delta=5,0$ mm

Oznaczenie		B.01	B.1	B.2	B.3	B.4	B.5	B.6
Zaw. włókien [kg/m ³]		1,0	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5
Energia zniszczenia $G_{f,5}$ [Nm]	I	18,6	18,2	21,2	22,1	38,8	38,4	41,6
	II	21,4	24,0	25,3	25,2	29,3	32,2	35,1
	III	21,8	21,0	20,9	28,9	33,4	30,3	28,3
Średnia energia zniszczenia $G_{f,5}$ [Nm]		20,6	21,1	22,5	25,4	33,8	33,6	35,0



Rys. 9. Energia zniszczenia przy ugięciu 5,0 mm w zależności od zawartości włókien

Badania wykazały, że wzrost zawartości włókien w składzie betonu nie zawsze wpływa korzystnie na analizowane właściwości mechaniczne. Dotyczy to przede wszystkim wytrzymałości betonu na ściskanie, gdzie zastosowanie włókien w ilości $4,5 \text{ kg/m}^3$ (skład B.6) obniża jego wytrzymałość o niemal 13% w stosunku do betonu bez włókien (skład B.0). Przyczyny należy szukać w różnicy pomiędzy modułami sprężystości materiałów. Około dziesięciokrotnie wyższy moduł sprężystości dla badanego betonu w stosunku do modułu sprężystości włókien świadczy o tym, iż włókna nie współpracują z matrycą betonową i ograniczają przekrój rzeczywiście ściskanego rdzenia próbki w czasie badania [7]. W przypadku badania wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu w zakresie proporcjonalności liniowej nie zauważono wymiernych korzyści płynących z zastosowania włókien, bez względu na ich ilość. Swoje zalety polimerowe włókna strukturalne ujawniają dopiero, gdy próbka po zarysowaniu, zostaje przez nie uciąglona, a sam beton staje się ciałem quasi-plastycznym, zdolnym do przenoszenia dodatkowych obciążeń. Wartość energii zniszczenia, badana zarówno przy ugięciu $\delta=3,33 \text{ mm}$ jak i $\delta=5,0 \text{ mm}$ wykazuje trend wzrostowy wraz z większą ilością włókien w składzie. Wzrost ten szczególnie widoczny jest w przypadku tej drugiej wartości ugięcia belki, gdyż im większe ugięcie, tym wyraźniej widać zależność energii zniszczenia od rzeczywistej pracy włókien w zarysowanym przekroju.

4. Podsumowanie i wnioski końcowe

Jak wykazują przeprowadzone badania, włókna polimerowe Mapefibre ST42 mogą stanowić bardzo dobry dodatek do betonów, w aspekcie konstrukcyjnym. Należałoby rozważyć przeprowadzenie analizy wpływu większej, niż w niniejszej pracy, zawartości włókien w składzie mieszanki, tj. $5,0 \text{ kg/m}^3$ i więcej, gdyż widać spory potencjał drzemący w przedmiotowym zbrojeniu rozproszonym. Jednocześnie nie wolno zapominać, konieczności modyfikacji składu mieszanki betonowej tak by jej zdolność do płynięcia i samozagęszczenia nie była nadmiernie zmniejszona przez dodatek włókien.

Literatura

- [1] S.H. Park, D.J. Kim, G.S. Ryu, K.T. Koh, Influence of macrofibers in the tensile stress-strain response of hybrid ultra high performance fiber reinforced concrete. *Cement and Concrete Composites*; 2011.
- [2] C.X. Qian, P. Stroeven, Development of hybrid polypropylene-steel fiber reinforced concrete. *Cement Concrete Research* 2000;30(1): 63–69.
- [3] D.J. Kim, S.H. Park, G.S. Ryu, K.T. Koh, Comparative flexural behavior of Hybrid Ultra High Performance Fiber Reinforced Concrete with different macro fibers, *Construction and Building Materials* 25 (2011) 4144–4155.
- [4] PN-EN 14651+A1:2007 Metoda badania betonu zbrojonego włóknem stalowym -- Pomiar wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu (granica proporcjonalności LOP).
- [5] RILEM TC 162-TDF Test and design methods for steel fibre reinforced concrete.
- [6] PN-EN 1992-1-1:2008 Projektowanie konstrukcji z betonu – Część 1-1: Reguły ogólne i reguły dla budynków
- [7] M.A.Glinicki, Beton ze zbrojeniem strukturalnym. XXV Ogólnopolskie warsztaty pracy projektanta konstrukcji. Szczyrk 2010.
- [8] PN-EN 206-1 Beton – część 1. wymagania właściwości produkcyjna i zgodność.