

NOŚNOŚĆ NA ŚCINANIE BELEK WYKONANYCH Z WŁÓKNOBETONU

Joanna STACHNIEWICZ, Marta KOSIOR-KAZBERUK, Julita KRASSOWSKA*

Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska, Politechnika Białostocka, ul. Wiejska 45 A, 15-351 Białystok

Streszczenie: W pracy analizowano wpływ zbrojenia rozproszonego na nośność na ścinanie elementów żelbetonowych. Do badań wybrano trzy rodzaje włókien stalowych o zróżnicowanej geometrii i kształcie. Na podstawie *fib* Model Code 2010 oznaczono wytrzymałość resztkową włóknobetonu na rozciąganie przy zginaniu, którą wykorzystano w obliczeniach teoretycznej nośności na ścinanie. Obliczenia te wykonanych na podstawie dwóch procedur obliczeniowych: *fib* Model Code 2010 i RILEM TC 162-TDF. Stwierdzono, że cechy włókien stalowych, takie jak geometria, a także sposób formowania powierzchni i zakończeń, które decydują o przyczepności włókna do matrycy cementowej, mają wpływ na nośność na ścinanie elementu zginanego. Zastosowane procedury obliczeniowe dają nieznacznie różniące się wyniki oceny nośności na ścinanie badanych elementów żelbetonowych.

Słowa kluczowe: włóknobeton, włókna stalowe, nośność na ścinanie, wytrzymałość resztkowa na rozciąganie przy zginaniu, procedury obliczeniowe.

1. Wprowadzenie

Popularność włókien jako zbrojenia rozproszonego w betonie w ostatnich latach stale rośnie. Wzrost zainteresowania zarówno technologów betonu, jak i konstruktorów stosowaniem włókien związany jest z rozwojem badań eksperymentalnych, które potwierdzają korzystny wpływ różnego typu włókien na właściwości betonu cementowego (Domański i Czkwianianc, 2006; Głodkowska i Kobaka, 2013; Khaloo i in., 2014). Włókna stosowane jako zbrojenie rozproszone mogą być wykonane z materiałów, takich jak: stal, szkło, tworzywo sztuczne, bazalt, itd. Wprowadzenie tego rodzaju dodatków zmienia właściwości mieszanki betonowej i stwardniałego betonu. Szeroki opis badań cech włóknobetonów można znaleźć, między innymi, w pracach Błaszczyskiego i Przybylskiej-Fałek (2012), Lee i Jacobsena (2011), Topçu i Canbaza (2007), Fischera i Li (2007).

W przypadku betonu konstrukcyjnego obecnie najczęściej stosowanym dodatkiem są włókna stalowe, ponieważ ich obecność powoduje zmianę charakteru zachowania elementu betonowego pod obciążeniem z kruchego na quasi-plastyczne (Michels i in., 2013; Farhat i in., 2007). W porównaniu do betonu zwykłego, beton z włóknami charakteryzuje się większą wytrzymałością na rozciąganie przy zginaniu, często również na ściskanie oraz ścinanie, a także zwiększoną odpornością zmęczeniową i udarnością. Poprawa właściwości wytrzymałościowych betonu przy rozciąganiu zależy od właściwego zakotwienia zbrojenia

rozproszonego w matrycy cementowej.

Prace badawcze nad zastosowaniem betonu z dodatkiem włókien stalowych w elementach konstrukcyjnych rozpoczęły się w latach sześćdziesiątych XX wieku (Romualdi i Mandel, 1964). W efekcie badań powstały propozycje procedur i standardów określających metody badań oraz obliczeń konstrukcji wykonanych z włóknobetonów, między innymi, takie jak RILEM TC162-TDF (2003) i *fib* Model Code 2010 (Ajdukiewicz i Walraven, 2014). Projektowanie konstrukcji z włóknobetonu opiera się głównie na wykorzystaniu wytrzymałości resztkowej po zarysowaniu, zapewnionej przez zbrojenie rozproszone (Kamiński i in., 2014). Włókna mogą być stosowane do poprawy zachowania konstrukcji w stanie granicznym nośności lub do poprawy warunków użytkowalności. W stanie granicznym nośności dodatek włókien stalowych może zastąpić częściowo lub całkowicie tradycyjne zbrojenie na rozciąganie lub ścinanie (Chunxiang i Patnaikuni, 1999; Dihn i in., 2010). Jednakże, zagadnienia inżynierii materiałowej związane z zastosowaniem włóknobetonów w elementach konstrukcyjnych są nadal niedostatecznie rozpoznane, co utrudnia rozpowszechnienie metod projektowania uwzględniających obecność zbrojenia rozproszonego w betonie.

Celem pracy była ocena wpływu różnego typu włókien stalowych na nośność elementu żelbetonowego na ścinanie. Wykonano badania doświadczalne w celu określenia wytrzymałości resztkowej na rozciąganie betonów z dodatkiem włókien. Wyznaczone wartości wytrzymałości resztkowej posłużyły do obliczenia

* Autor odpowiedzialny za korespondencję. E-mail: j.krassowska@pb.edu.pl

ności na ścinanie belki żelbetowej, według procedur zaproponowanych w *fib Model Code 2010* (Ajdukiewicz i Walraven, 2014) oraz RILEM TC162-TDF (2003).

2. Badania doświadczalne betonów zawierających włókna stalowe

2.1. Materiały i sposób przygotowania próbek

Do wykonania elementów próbnych zastosowano cement portlandzki CEM I 42,5. Zawartość cementu we wszystkich recepturach była stała i wynosiła 416 kg/m³. Wartość wskaźnika w/c była równa 0,40. Jako kruszywo stosowano mieszaninę piasku o uziarnieniu do 2 mm i naturalnego kruszywa grubego o ziarnach do 4 mm. Frakcja ziarnowa nie większa niż 2 mm stanowiła 51%, a frakcja 2-4 mm – 49% stosu okruszowego. Superplastyfikator na bazie polikarboksylatów, stosowany w celu prawidłowego rozprowadzenia włókien w mieszance, dozowano wraz z wodą zarobową w ilości 0,8% masy cementu. Zawartość włókien wynosiła 1% objętościowo (78 kg/m³). Zbrojeniem rozproszonym zastąpiono objętościowo część kruszywa. Porównawczo badano również właściwości mechaniczne betonu bez dodatku włókien. Zastosowane trzy rodzaje włókien stalowych, dostępne na krajowym rynku, opisano w tabeli 1.

Poszczególne serie badanych betonów w tabeli 1 oznaczono jak: WS0 – mieszanka bez dodatku włókien, WS60 – mieszanka z dodatkiem włókien gładkich o odwrotnym haczykowatym zakończeniu i długości 60 mm, WS50 – mieszanka z dodatkiem włókien gładkich o haczykowatym zakończeniu i długości 50 mm, WSA50 – mieszanka z dodatkiem włókien karbowanych o haczykowatych zakończeniach i długości 50 mm. Wszystkie typy włókien miały średnicę $d = 1,0$ mm.

Wykonanie mieszanki polegało na wstępnym wymieszaniu składników suchych z włóknami, a następnie wprowadzeniu wody zarobowej z domieszką

superplastyfikatora. Mieszankę układano w formach w taki sposób, aby zachować równomierne i przestrzenne ukierunkowanie włókien w całej objętości próbki. Następnie, próbki zagęszczano na stole wibracyjnym przez około 10 sekund. Próbki zabezpieczono przed odparowywaniem wody, a po 24 h od wykonania, rozformowano. Elementy próbne były przechowywane w wodzie o temperaturze 18 ± 2 °C do czasu badania.

2.2. Metody badań

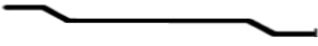
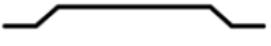

– Badania właściwości mechanicznych betonów z włóknami

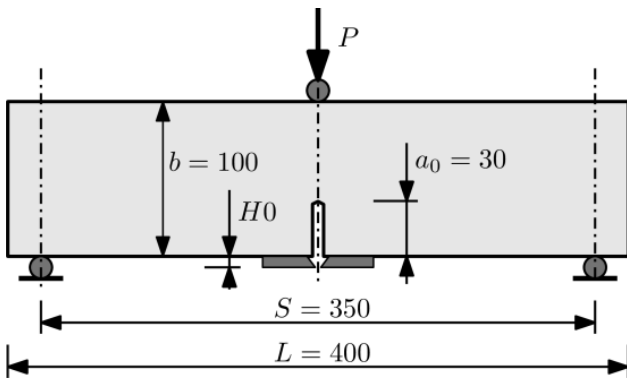
Badanie wytrzymałości betonu na ściskanie wykonano zgodnie z normą PN-EN 12390-3:2011 *Badania betonu - Część 3: Wytrzymałość na ściskanie próbek do badań*, wykorzystując próbki sześciennie o boku 100 mm. Każda seria liczyła 6 próbek. Moduł sprężystości podłużnej oznaczono zgodnie z normą PN-EN 12390-13:2014 *Badania betonu - Część 13: Wyznaczanie siecznego modułu sprężystości przy ściskaniu*, stosując próbki walcowe o średnicy 150 mm i wysokości 300 mm. Każda seria liczyła 3 próbki.

– Badanie wytrzymałości resztkowej na rozciąganie przy zginaniu

Podstawą do wyznaczenia resztkowej wytrzymałości betonu na rozciąganie jest wykres obciążenia P w funkcji rozwarcia wylotu szczeliny pierwotnej CMOD (*Crack Mouth Opening Displacement*), uzyskany w rezultacie obciążania belki ze szczeliną pierwotną, w warunkach trójpunktowego zginania, jak pokazano na rysunku 1. Wykorzystano elementy próbne o wymiarach 100×100×400 mm. Szczelina pierwotna, wykonywana poprzez nacięcie za pomocą piły diamentowej, miała kształt wąskiego karbu typu U o głębokości 30 mm i szerokości 3 mm. Nacięcie wykonywano w dniu poprzedzającym realizację pomiarów.

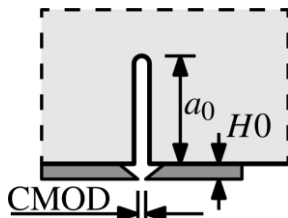
Tab. 1. Zestawienie typów włókien użytych do badań doświadczalnych

Oznaczenie mieszanki betonowej	Rodzaj włókien	Smukłość $A = l / d$	Kształt
WS0	Bez włókien	–	–
WS60	Włókna gładkie o odwrotnym haczykowym zakończeniu	60	
WS50	Włókna gładkie o haczykowym zakończeniu	50	
WSA50	Włókna karbowane o haczykowym zakończeniu	50	



Rys. 1. Wymiary w mm i sposób obciążenia elementu próbnego, według wymagań *fib* Model Code 2010 (Kosior-Kazberuk, 2013)

Konstrukcja stanowiska badawczego zapewniała warunki ustabilizowanego niszczenia próbek. Szerokość rozwarcia wylotu szczeliny pierwotnej mierzono za pomocą ekstensometru blaszkowego mocowanego za pomocą ostrzy stalowych o grubości 5 mm (rys. 2). W trakcie pomiaru rejestrowano w sposób ciągły zmiany siły obciążającej P w funkcji $CMOD$, zgodnie z ogólnymi wymaganiami *fib* Model Code 2010 (Ajdukiewicz i Walraven, 2014).



Rys. 2. Sposób pomiaru szerokości wylotu szczeliny pierwotnej $CMOD$ (Kosior-Kazberuk, 2013)

2.3. Wyniki badania właściwości mechanicznych betonów

W tabeli 2 przedstawiono średnie wartości wytrzymałości na ściskanie i modułu sprężystości podłużnej betonów po 28 dniach dojrzewania.

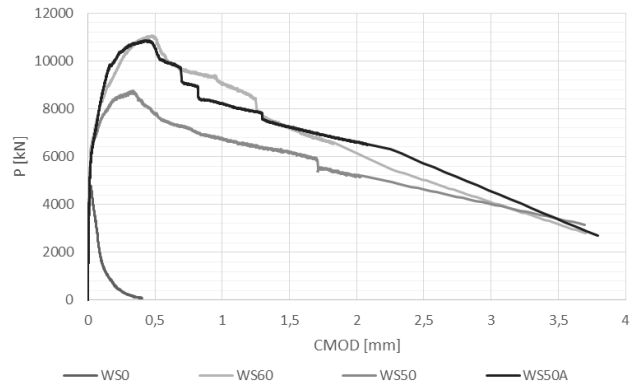
Dodatek włókien stalowych w przypadku wszystkich badanych włókno betonów spowodował wzrost wytrzymałości na ściskanie. Seria WS60 z dodatkiem włókien o długości 60 mm charakteryzowała się największym przyrostem wytrzymałości w stosunku do betonu kontrolnego. Badania modułu sprężystości podłużnej potwierdzają tezę, że włókna nie poprawiają istotnie sprężystości betonu.

Tab. 2. Średnie wartości wytrzymałości na ściskanie f_{ck} statycznego modułu sprężystości E betonów z włóknami w porównaniu do betonu kontrolnego bez włókien

Oznaczenie serii	f_{ck} [MPa]	Δf_{ck} [%]	E [MPa]	ΔE [%]
WS0	64,20	–	42044,30	–
WS60	78,30	22,01	42864,63	1,95
WS50	71,80	11,86	44391,28	5,58
WSA50	70,10	9,22	45226,48	7,57

2.4. Wyniki oznaczenia resztkowej wytrzymałości na rozciąganie włókno betonów

Przykładowe wykresy zależności $P-CMOD$, uzyskane w trakcie badań, przedstawiono na rysunku 3. Wykresy posłużyły do wyznaczenia resztkowej wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu betonów z włóknami zgodnie z wymaganiami *fib* Model Code 2010 (Ajdukiewicz i Walraven, 2014).



Rys. 3. Zależności $P-CMOD$ dla betonów z włóknami i betonu kontrolnego

Największe wartości siły niszczącej P zanotowano w przypadku betonów oznaczonych WS60 i WSA50. Geometria i sposób formowania powierzchni oraz zakończeń włókien miały również wpływ na kształt wykresu w zakresie pokrytycznym. Resztkową wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu $f_{R,j}$ określa się według wzoru:

$$f_{R,j} = \frac{3P_j l}{2bh_{sp}^2} \quad (1)$$

gdzie: P_j jest obciążeniem odpowiadającym $CMOD = CMOD_j$ w N, przy czym: $j = 1$: $CMOD_1 = 0,5$ mm; $j = 2$: $CMOD_2 = 1,5$ mm; $j = 3$: $CMOD_3 = 2,5$ mm; $j = 4$: $CMOD_4 = 3,5$ mm, l jest rozpiętością belki, b jest szerokością belki, a h_{sp} jest odległością między górnym końcem nacięcia, a górną krawędzią belki.

W tabeli 3 zestawiono obliczone wartości wytrzymałości resztkowej na rozciąganie przy zginaniu betonów z dodatkiem włókien.

Tab. 3. Średnia wytrzymałość resztkowa na rozciąganie przy zginaniu próbki z dodatkiem włókien

Parametr	Jednostka	WS 60	WS50	WSA50
<i>CMOD</i> ₁ = 0,5 mm				
<i>P</i> ₁	kN	10,38	7,03	10,31
<i>f</i> _{<i>R</i>,1}	N/mm ²	11,12	7,52	11,04
<i>CMOD</i> ₂ = 1,5 mm				
<i>P</i> ₂	kN	5,87	5,72	7,04
<i>f</i> _{<i>R</i>,2}	N/mm ²	6,29	6,13	7,55
<i>CMOD</i> ₃ = 2,5 mm				
<i>P</i> ₃	kN	4,30	4,55	5,05
<i>f</i> _{<i>R</i>,3}	N/mm ²	4,61	4,85	5,41
<i>CMOD</i> ₄ = 3,5 mm				
<i>P</i> ₄	kN	2,80	3,45	3,45
<i>f</i> _{<i>R</i>,4}	N/mm ²	3,00	3,70	3,70

Analiza wykresów zależności *P-CMOD* (rys. 3), podczas próby zginania elementów betonowych z dodatkiem włókien stalowych, wykazała, że powstanie pierwszej rysy nie prowadzi do nagłego zniszczenia elementu. Zarysowania w elemencie betonowym z włóknami pojawiają się przy większym obciążeniu w porównaniu do betonu bez włókien. Wraz z rozwojem rysy krytycznej naprężenia rozciągające zostają przejęte przez włókna. Kolejno powstające zarysowania w betonie prowadzą do dalszego odkształcania się elementu, ale nie do całkowitego zniszczenia.

Największą wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu wykazały próbki z dodatkiem włókien gładkich o długości 60 mm (WS60) oraz z dodatkiem karbowanych włókien o długości 50 mm (WSA50). Zwiększona wytrzymałość betonu mogła wynikać z dobrej przyczepności (włókna karbowane), smukłości (włókna o długości 60 mm) i kształtu włókien (odwrotne haczykowe zakończenia).

2.3. Klasyfikacja włóknobetonów według *fib Model Code 2010*

W celu sklasyfikowania zgodnie z *fib Model Code 2010* (Ajdukiewicz i Walraven, 2014) wytrzymałości włóknobetonów założono ich liniowo-sprężyste zachowanie po zarysowaniu. Analizie poddano charakterystyczne wartości wytrzymałości resztkowej na zginanie, ponieważ są one istotne dla warunków nośności *f*_{*R*3*k*}, jak i użytkowości *f*_{*R*1*k*}.

Do zastosowań konstrukcyjnych projektant musi sprecyzować klasę wytrzymałości resztkowej, stosunek *f*_{*R*3*k*} / *f*_{*R*1*k*} oraz rodzaj włókien. Klasyfikację próbek na podstawie wyników przeprowadzonych badań przedstawiono w tabeli 4.

Badane betony serii WS60 i WSA50 zaliczono do klasy „11a”, co oznacza, że jego resztkowa wytrzymałość *f*_{*R*1*k*} zawiera się w przedziale od 10 do 11 MPa, a stosunek *f*_{*R*3*k*} / *f*_{*R*1*k*} w przedziale od 0,5 do 0,7. Serię WS50 zaliczono do klasy „8a”, co oznacza, że resztkowa wytrzymałość betonu *f*_{*R*1*k*} zawiera się w przedziale od 7 do 8 MPa, a stosunek *f*_{*R*3*k*} / *f*_{*R*1*k*} w przedziale od 0,5 do 0,7.

Na podstawie kształtu otrzymanych zależności *P-CMOD* (rys. 3) można stwierdzić, że mamy do czynienia ze związkami konstytutywnym dla włóknobetonu po zarysowaniu, odpowiadającym modelowi liniowemu z osłabieniem po zarysowaniu. Model liniowy określany jest: resztkową wytrzymałością w stanie użytkowości *f*_{*F*1*s*} i graniczną resztkową wytrzymałością na rozciąganie przy zginaniu *f*_{*F*1*u*}. Są one definiowane za pomocą wartości resztkowych wytrzymałości na rozciąganie opisanych wzorami:

$$f_{F1u} = 0,45 f_{R1} \quad (2)$$

$$f_{F1u} = f_{F1s} - \frac{w_u}{CMOD_2} (f_{F1s} - 0,5 f_{R2} + 0,2 f_{R1}) \geq 0 \quad (3)$$

gdzie *w_u* jest maksymalną szerokością rysy akceptowaną w projektowaniu konstrukcyjnym i wynosi 1,5 mm.

Wytrzymałości, których wartości podano w tabeli 5 pozwalają na wyznaczenie nośności na zginanie i ścinanie elementów z dodatkiem włókien.

Tab. 4. Klasyfikacja włóknobetonów

Oznaczenie serii	Uśredniona wytrzymałość resztkowa <i>f</i> _{<i>R</i>1<i>k</i>} [MPa]	Oznaczenie wytrzymałości	Stosunek <i>f</i> _{<i>R</i>3<i>k</i>} / <i>f</i> _{<i>R</i>1<i>k</i>}
WS0	–	–	–
WS60	11,12	11	a
WS50	7,53	8	a
WSA50	11,04	11	a

Tab. 5. Graniczna resztkowa wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu i resztkowa wytrzymałość w stanie użytkowości

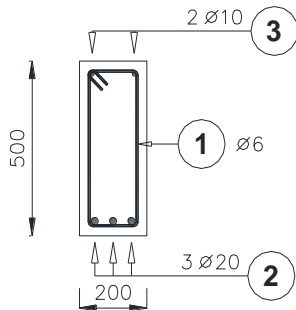
Parametr	Oznaczenie serii		
Resztkowa wytrzymałość według <i>fib Model Code 2010</i>	WS60	WS50	WSA50
Resztkowa wytrzymałość w stanie użytkowości <i>f</i> _{<i>F</i>1<i>s</i>} [MPa]	5,003	3,389	4,969
Graniczna resztkowa wytrzymałość <i>f</i> _{<i>F</i>1<i>u</i>} [MPa]	2,049	1,914	2,286

3. Obliczenie nośności belki z włóknobetonu na ścinanie

3.1. Założenia do obliczeń belek z betonu z dodatkiem włókien stalowych

Aby ocenić wpływ obecności włókien na nośność na ścinanie wykonano obliczenia belki żelbetowej ze zbrojeniem podłużnym i zbrojeniem rozproszonym w postaci włókien. Porównawczo obliczono nośność na ścinanie belki żelbetowej z betonu zwykłego, uwzględniając zbrojenie podłużne. Przyjęto belkę o długości $l_{eff} = 5,70$ m oraz przekroju poprzecznym 200x500 mm. Schemat zbrojenia pokazano na rysunku 4. Przyjęto obliczeniowy moment zginający $M_{sd} = 130,84$ kNm oraz obliczeniową siłę poprzeczną $V_{Ed} = 91,82$ kN, o wartościach ustalonych na podstawie zestawienia obciążeń dla belki stropowej w budynku magazynowym, zakładając obciążenie stałe $g = 12,716$ kNm i obciążenie zmienne $q = 19,50$ kN.

Obliczenia nośności na ścinanie wykonano według dwóch procedur: *fib Model Code 2010* (Ajdukiewicz i Walraven, 2014) i RILEM TC-162TDF (2003). W obliczeniach nie uwzględniano zbrojenia poprzecznego w formie strzemion.



Rys. 4. Rozmieszczenie zbrojenia podłużnego w przekroju poprzecznym belki

3.2. Obliczenia nośności na ścinanie belki żelbetowej bez zbrojenia rozproszonego według Eurokodu 2

Obliczeniowa siła poprzeczna przenoszona przez element z betonu zwykłego (WS0) bez zbrojenia na ścinanie wynosi:

$$V_{Rd,c} = \left[c_{Rd,c} \cdot k \cdot (100 \cdot \rho_L \cdot f_{ck})^{\frac{1}{3}} + \sigma_{cp} \right] \cdot b_w \cdot d = 79,24 \text{ kN} \quad (4)$$

gdzie: d jest wysokością użyteczną przekroju, $d = 8$ cm, b_w jest najmniejszą szerokością strefy ścinania w mm, $b_w = 12$ cm, f_{ck} jest wytrzymałością charakterystyczną betonu na ściskanie w MPa, a k jest współczynnikiem wyznaczanym z zależności (wartość d w mm):

$$k = 1 + \sqrt{\frac{200}{d}} \leq 2,0$$

ρ_L jest stopniem zbrojenia podłużnego:

$$\rho_L = \frac{A_{sL}}{b_w \cdot d} \leq 0,02$$

A_{sL} jest polem przekroju zbrojenia rozciąganego, $A_{sL} = 1,01$ cm², σ_{cp} jest naprężeniem normalnym w przekroju elementu:

$$\sigma_{cp} = \frac{N_{Ed}}{A_c} \leq 0,2 \cdot f_{cd}$$

N_{Ed} jest siłą podłużną, $N_{Ed} = 0$, A_c jest całkowitym polem przekroju betonu, f_{cd} jest wytrzymałością obliczeniową przekroju na ściskanie w MPa, a $c_{Rd,c}$ współczynnikiem określany ze wzoru:

$$c_{Rd,c} = \frac{0,18}{\gamma_c}$$

3.3. Obliczenia nośności belki fibrobetonowej ze zbrojeniem podłużnym według fib Model Code 2010

Nośność belki (tab. 6) na ścinanie oblicza się według wzoru:

$$V_{Rd,f} = \left\{ \frac{0,18}{\gamma_c} k \left[100 \rho_L \left(1 + 7,5 \frac{f_{Fruk}}{f_{ctk}} \right) f_{ck} \right]^{\frac{1}{3}} + \sigma_{cp} \right\} b_w d \quad (5)$$

gdzie: γ_c jest częściowym współczynnikiem bezpieczeństwa dla betonu bez włókien, według *fib Model Code 2010*, $\gamma_c = 1,4$, k jest czynnikiem uwzględniającym efekt skali, d jest wysokością efektywną przekroju w mm, ρ_L jest stopniem zbrojenia podłużnego, f_{Fruk} jest wartością charakterystyczną resztkowej wytrzymałości F_{RC} na rozciąganie, przy założeniu $w_u = 1,5$ mm; f_{ctk} jest wartością charakterystyczną wytrzymałości na rozciąganie betonu bez włókien w MPa, f_{ck} jest wartością charakterystyczną wytrzymałości betonu na ściskanie w MPa, przy czym $\sigma_{cp} = N_{ed}/A_c < 0,2f_{cd}$ jest średnim naprężeniem działającym na przekrój betonowy A_c przy sile podłużnej N_{ed} wskutek obciążenia, a b_w jest najmniejszą szerokością przekroju w strefie rozciąganej w mm.

Tab. 6. Obliczeniowa nośność na ścinanie elementu ze zbrojeniem podłużnym, bez zbrojenia poprzecznego według *fib Model Code 2010*

V _{Rd,F} [kN]		
WS60	WS50	WSA50
129,88	124,00	128,81

Obliczeniowa nośność na ścinanie, $V_{Rd,F}$, powinna być większa od minimalnej nośności zbrojenia na ścinanie $V_{Rd,Fmin}$. Wyniki obliczeń tej wielkości według wzorów (6) i (7) zamieszczono w tabeli 7.

$$V_{Rd,Fmin} = (v_{min} + 0,15\sigma_{cp}) b_w d \quad (6)$$

$$v_{\min} = 0,035k^{\frac{3}{2}}f_{ck}^{\frac{1}{2}} \quad (7)$$

Tab. 7. Minimalna nośność na ścinanie belki fibrobetonowej

$V_{Rd,Fmin}$ [kN]		
WS60	WS50	WSA50
60,91	58,32	57,63

3.4. Obliczenia nośności belki fibrobetonowej ze zbrojeniem podłużnym według RILEM TC 162-TDF

Zalecenia metody według RILEM TC 162-TDF (2003) są oparte na założeniach obliczeniowych nośności na ścinanie opisanych w normie projektowania konstrukcji betonowych EC2 - PN-EN 1992-1-1:2008. Eurokod 2 - Projektowanie konstrukcji z betonu - Część 1-1: Reguły ogólne i reguły dla budynków. Metoda ta zakłada, że zdolność do przenoszenia siły ścinającej (V_{Rd}) jest sumą trzech składników: nośności elementu betonowego (V_{cd}), wpływu strzemion (V_{wd}) oraz wpływu włókien (V_{fd}) (Kamiński i in., 2014). Decydującą wartością jest $f_{R,4}$, która reprezentuje resztkowe naprężenia rozciągające przy zginaniu, wyznaczone podczas badania trójpunktowego zginania belki ze szczeliną pierwotną.

Nośności na ścinanie betonu V_{Rcd} oblicza się według wzoru (4), biorąc pod uwagę wyznaczone właściwości wytrzymałościowe włókno-betonów. Wyniki obliczeń nośności na ścinanie elementu betonowego według RILEM TC 162-TDF (2003) zamieszczono w tabeli 8.

Tab. 8. Obliczeniowe wartości nośności elementu betonowego na ścinanie V_{cd}

V_{cd} [kN]		
WS60	WS50	WSA50
78,83	76,58	75,97

Obliczenie wartości V_{fd} , uwzględniającej wpływ włókien wykonuje się według wzoru (8):

$$V_{fd} = k_f k_l \tau_{fd} b_w d \quad (8)$$

w którym:

$$k_f = 1 + n \left(\frac{h_f}{b_w} \right) \left(\frac{h_f}{d} \right) \leq 1,5 \quad (9)$$

$$k_l = 1 + \sqrt{\frac{200}{d}} \leq 2,0 \quad (10)$$

$$\tau_{fd} = 0,12 f_{R,4} \quad (11)$$

gdzie: k_f jest współczynnikiem uwzględniającym kształt przekroju, $k_f = 1$, dla przekroju prostokątnego belki, $k_l = k$ jest współczynnikiem uwzględniającym wysokość przekroju, a τ_{fd} jest obliczeniową wytrzymałością

na ścinanie włókno-betonu w MPa.

Obliczeniowe wartości wytrzymałości włókno-betonów na ścinanie podano w tabeli 9, wartości nośności belki z uwagi na obecność włókien w betonie – w tabeli 10, a całkowitą obliczeniową nośność na ścinanie elementu z włókno-betonu ze zbrojeniem podłużnym – w tabeli 11.

Tab. 9. Obliczeniowa wytrzymałość na ścinanie włókno-betonu

τ_{fd} [MPa]		
WS60	WS50	WSA50
0,360	0,444	0,444

Tab. 10. Obliczeniowe nośności na ścinanie belki określone z uwagi na obecność włókien

V_{fd} [kN]		
WS60	WS50	WSA50
38,47	47,40	47,40

Obliczenie zdolności do przenoszenia siły ścinającej V_{Rd} (w rozważanym przypadku nie uwzględniono zbrojenia poprzecznego) określa wzór (12):

$$V_{Rd} = V_{cd} + V_{fd} \quad (12)$$

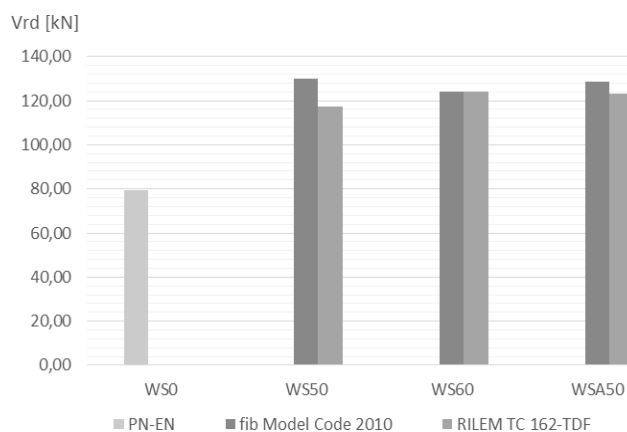
gdzie: V_{cd} jest nośnością elementu betonowego w kN, a V_{fd} jest nośnością z uwagi na obecność włókien w kN.

Tab. 11. Całkowita nośność na ścinanie belki włókno-betonowej bez zbrojenia poprzecznego

V_{Rd} [kN]		
WS60	WS50	WSA50
117,30	123,98	123,37

3.5. Porównanie wyników obliczeń nośności według obu procedur projektowych

Obliczeniowe wartości nośności na ścinanie belki z włókno-betonu przedstawiono na rysunku 5.



Rys. 5. Porównywanie wyników obliczenia nośności na ścinanie belki włókno-betonowej według fib Model Code 2010 oraz RILEM TC 162-TDF

Przeprowadzone obliczenia nośności elementu żelbetowego ze zbrojeniem rozproszonym wskazują na niewielkie różnice w szacowaniu nośności na ścinanie otrzymane przy zastosowaniu omawianych procedur.

Procedura *fib Model Code 2010* jest obecnie najnowszą metodą projektowania elementów z włóknobetonu i daje największe wartości nośności obliczeniowej. Obliczenia według tej metody oparte są na wartości resztkowej wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu $f_{R,4}$. W odróżnieniu od *fib Model Code 2010*, metoda RILEM TC 162-TDF nie uwzględnia współczynników bezpieczeństwa, a decydującą wartością przy obliczaniu nośności jest resztkowa wytrzymałość $f_{R,4}$.

Na nośność na ścinanie belek wykonanych z włóknobetonu wpływają również parametry stosowanych włókien, takie jak: długość, smukłość oraz przyczepność włókien do matrycy cementowej. Z wykresu porównawczego (rys. 5) wynika, że według obu metod największą nośność na ścinanie ma belka wykonana z betonu z dodatkiem karbowanych włókien stalowych o długości 50 mm, średnicy 1,0 mm i haczykowatych zakończeniach (WSA50). Niewiele niższą nośnością na ścinanie wykazały się belki z betonu z dodatkiem gładkich włókien o długości 60 mm, średnicy 1,0 mm i haczykowatym zakończeniu (WS60). Najmniejsze wartości nośności uzyskano dla belek z dodatkiem gładkich włókien stalowych o długości 50 mm (WS50).

4. Wnioski

W pracy analizowano wpływ trzech rodzajów włókien stalowych na nośność na ścinanie elementów żelbetowych. Porównano dwie metody szacowania nośności belek włókno betonowych: *fib Model Code 2010* i RILEM TC 162-TDF, różniące się założeniami obliczeniowymi. Wskazano czynniki wpływające na nośność na ścinanie belek wzmocnionych włóknami.

Analiza wyników badań pozwoliła na sformułowanie następujących wniosków:

- Dodatek włókien stalowych jako zbrojenia rozproszonego w elementach betonowych może prowadzić do redukcji zbrojenia poprzecznego. Dzięki temu, zmniejszony koszt i czas pracy związany z wykonaniem zbrojenia elementów strzemionami, można przeznaczyć na zwiększenie kosztów innych materiałów (włókien, składników betonu) w kierunku uzyskania pożądanych właściwości kompozytu.
- Badania przeprowadzono stosując jednakową zawartość włókien stalowych (1% objętościowo). Stwierdzono, że nośność betonowego elementu z dodatkiem włókien zależy od parametrów włókien, między innymi geometrii, kształtu i wykończenia ich powierzchni. W rozważanym przypadku najkorzystniejszy wpływ na nośność elementu betonowego miały karbowane włókna stalowe o długości 50 mm (WSA50). Natomiast najmniejszą nośność wykazał element z dodatkiem włókien gładkich (WS50). Istotny wpływ na wyniki miała także długość włókien. Na podstawie wyników badań

eksperymentalnych stwierdzono największą wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu betonów z dodatkiem najdłuższych włókien.

- Na podstawie analizy obliczeń przykładowego elementu żelbetowego z dodatkiem włókien stalowych zauważono różnice w wynikach obliczeń według analizowanych metod. Wykazano, iż wartości obliczone według RILEM TC 162-TDF mogą się różnić od *fib Model Code 2010*, ponieważ metoda ta nie uwzględnia współczynników bezpieczeństwa, a decydującą wartością we wzorze jest resztkowa wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu elementu z fibrobetonu $f_{R,4}$. Natomiast *fib Model Code 2010* zakłada inne wartości częściowego współczynnika bezpieczeństwa γ_c , a obliczenia oparte są na tej samej wartości resztkowej wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu $f_{R,4}$. Metoda *fib Model Code 2010* daje nieco większe wartości nośności na ścinanie belek z fibrobetonu niż procedura według RILEM TC 162-TDF.

Literatura

- Ajdukiewicz A., Walraven J. (2014). *Fib Model Code 2010*. Pre – norma Konstrukcji Betonowych, Tom 1 i 2. SPC, Kraków.
- Błaszczński T.Z., Przybylska-Fałek M. (2012). Fibrobeton jako materiał konstrukcyjny. *Izolacje*, Vol. 17, 44-50.
- Chuxiang Q., Patnaikuni I. (1999). Properties of high-strength steel fiber-reinforced concrete beams in bending. *Cement&Concrete Composites*, Vol. 21, 73-81.
- Dinh H.H., Parra-Montesinos G.J., Wight J.K. (2010). Shear behavior of steel fiber-reinforced concrete beams without stirrup reinforcement. *ACI Structural Journal*, Vol. 107, 597-606.
- Domański T., Czkwianianc A. (2006). Wpływ zbrojenia rozproszonego na parametry mechaniczne betonu. *Przegląd Budowlany*, No. 6, 32-36.
- Farhat F.A., Nicolaides D., Kanellopoulos A., Karihaloo B.L. (2007). High performance fibre-reinforced cementitious composite (CARDIFRC) – Performance and application to retrofitting. *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 74, 151-167.
- Fischer G., Li V.C. (2007). Effect of fiber reinforcement on the response of structural members. *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 74, 258-272.
- Głodkowska W., Kobaka J. (2013). Modelling of properties and distribution of steel fibres within a fine aggregate concrete. *Construction and Building Materials*, Vol. 44, 645-653.
- Kamiński M., Bywalski C., Kaźmierowski M. (2014). Nośność na ścinanie belek wykonanych z fibrobetonu. *Materiały Budowlane*, No. 6, 76-77.
- Khaloo A., Raisi E.M., Hosseini P., Tahsiri H. (2014). Mechanical performance of self-compacting concrete reinforced with steel fibres. *Construction and Building Materials*, Vol. 51, 179-186.
- Kosior-Kazberuk M. (2013). *Ocena degradacji betonu konstrukcyjnego poddanego procesom niszczenia mrozowego*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Białostockiej, Białystok.
- Lee S.F., Jacobsen S. (2011). Study of interfacial microstructure, fracture energy, compressive energy and debonding load of steel fiber-reinforced mortar. *Materials and Structures*, Vol. 44, 1451-1465.

- Michels J., Christen R., Waldmann D. (2013). Experimental and numerical investigation on postcracking behavior of steel fiber reinforced concrete. *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 98, 326-349.
- RILEM TC 162-TDF (2003). Test and design methods for steel fibre reinforced concrete. *Materials and Structures*, Vol. 36, 560-567.
- Romualdi J., Mandel J. (1964). Tensile strength of concrete affected by uniformly distributed and closely spaced short lengths of wire reinforcement. *ACI Journal*, Proc. 61, 657-672.
- Topçu I.B., Canbaza M. (2007). Effect of different fibers on the mechanical properties of concrete containing fly ash. *Construction and Building Materials*, Vol. 44, 1486-1491.

SHEAR CAPACITY OF FIBRE REINFORCED CONCRETE BEAMS

Abstract: The influence of dispersed reinforcement on the shear capacity of reinforced concrete elements was analysed. Three types of steel fibres with different geometries and shapes were selected for the test. The residual flexural strength of concrete with fibres was determined based on the procedure of *fib* Model Code 2010. The residual strength was used in the calculation of the theoretical shear capacity according to two calculation procedures: *fib* Model Code 2010 and RILEM TC 162-TDF. It was found that the property characteristics of steel fibres, such as geometry, as well as the method of surface forming and endings that determine the adhesion of the fibres to the cement matrix, have an influence on the shear capacity of bending element. Applied computational procedures give slightly different results of the shear capacity evaluation calculated using both methods.