

Wpływ kształtu włókien na właściwości mechaniczne betonu samozagęszczającego się ze zbrojeniem rozproszonym

Effect of the shape of steel fibers on the mechanical properties of reinforced self-compacting concrete

1. Wprowadzenie

Beton samozagęszczający się stał się bardzo popularnym materiałem konstrukcyjnym, dzięki jego dwóm właściwościom: „płynięcia” i szczelnego wypełniania deskowań, nawet z gęstym zbrojeniem (1-3). Dlatego też doskonale nadaje się do wykonywania skomplikowanych konstrukcji z gęstym zbrojeniem (4, 5). Jednak po stwardnieniu beton samozagęszczający się ma ten sam stopień kruchości co zwykły beton (6). W związku z tym, w celu ograniczenia powstawania mikrorys skurczowych stosuje się zbrojenie betonu samozagęszczającego się włóknami stalowymi. Jak wiadomo, włókna stalowe utrudniają propagację rys podczas obciążania betonu oraz współpracując z matrycą betonową biorą udział w przenoszeniu obciążeń (7). Zbrojenie to poprawia niektóre właściwości mechaniczne betonu, zwłaszcza w zakresie obciążeń, w którym traci on sprężystość.

Ogólnie wiadomo, że obok przyczepności stwardniałego zaczynu cementowego do włókien oraz ich zawartości, kształt i wymiary włókien mają znaczny wpływ na właściwości zbrojonego betonu. W literaturze można znaleźć empiryczne zależności określające wytrzymałość na rozciąganie fibrobetonu z włóknami stalowymi, w których główną zmienną, poza zawartością samych włókien i wytrzymałością matrycy, jest smukłość włókien (6, 8). Wiadomo, że dla stopnia zbrojenia większego niż 1 % kształt zbrojenia rozproszonego ma wpływ na wytrzymałość. W niniejszej pracy podjęto próbę zbadania wpływu kształtu włókien, o tej samej smukłości, na właściwości mechaniczne betonu samozagęszczającego się z 0,5% dodatkiem zbrojenia rozproszonego.

Opracowano wiele zaleceń dotyczących analizy betonu zbrojonego włóknami: ASTM C 1018, JSCE (10), RILEM TC 162-TDF (9) i EN 14651. Niektóre wytyczne, tj. ASTM C 1018 i przedstawione w (10) zalecają badanie próbek bez nacięcia w próbie czteropunktowego zginania, a inne próbek z nacięciem metodą trzypunktowego zginania, tj. RILEM TC 162-TDF (9) i europejska norma EN 14651. Zalecane przekroje poprzeczne elementów do badań są zbliżone

1. Introduction

Nowadays, self-compacting concrete (SCC) is a widely applied construction material due to two main properties of its mix: it flows and fills the framework, even with dense reinforcement, and is compacting under the gravity forces (1-3). These properties make this concrete very suitable for construction of complicated shapes (4, 5). However, after hardening, the self-compacting concrete is as brittle as the ordinary concrete, of the same class (6). In order to reduce the possibility of the shrinkage micro-cracks formation, the SCC is frequently reinforced with steel fibers. As it is known, steel fibers hinder the propagation of cracks during the loading of concrete and are contributing with cement matrix in the transmission of loads (7). These fibres improve some mechanical properties of concrete, especially in the post-peak region.

It is well-known that apart from the factors such as: the bond of cement matrix with fibers and their content, the shape and size of fibers have a major impact on their effect on concrete properties. In literature the empirical formulae linking the tensile strength of fiber concrete with steel fibers content can be found, in which the main variable, apart from the content of fibers and matrix strength, is the fibers slenderness (6). It is known that, for the degree of reinforcement higher than 1%, the shape of fibres affects the strength of concrete. The goal of this work was to investigate the effect of fibers shape on mechanical properties of self-compacting concrete reinforced with fibres (SFR-SCC) of the comparable slenderness, and volume content of 0.5%.

A number of recommendations for the studies of fiber reinforced concrete were developed: ASTM C 1018, RILEM TC 162-TDF (9), JSCE (10), and EN 14651. Some guidelines, i. e. ASTM C 1018 or presented in (10) promote to examine the samples without notch, in four-point bending test, and others beams with notch in three-point bending test, like RILEM TC 162-TDF (9) and based on it European standard EN 14651. Recommended cross sections of elements for tests are similar and are 100x100 mm or 150 x

i wynoszą 100 x 100 mm bądź 150 x 150 mm, o długości równej 550 mm. W niniejszym artykule do badania belek zbrojonych włóknami stalowymi wybrano metody podane w RILEM TC 162-TDF (9) oraz w EN 14651. Na podstawie uzyskanych wyników podjęto próbę analizy właściwości mechanicznych, przede wszystkim wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu oraz tej wytrzymałości resztkowej.

2. Materiały

Badania przeprowadzono na próbkach wykonanych z betonu samozagęszczającego się, zbrojonego włóknami stalowymi (tablica 1). Dla uzyskania odpowiedniej urabialności i trwałości mieszanki zastosowano superplastifikator Glenium SKY 592 i stabilizator RheoMATRIX. Całkowity czas przygotowania mieszanki betonowej wyniósł 7 minut. Kolejność mieszania składników pokazano na rysunku 1. Dla każdej kombinacji włókien były badane trzy próbki.

Udział objętościowy zbrojenia rozproszonego każdorazowo wynosił 0,5% (40 kg/m³). Spośród włókien dostępnych na rynku wybrano włókna o różnych kształtach, ale o podobnym stosunku długości do średnicy (smukłości). Jak wynika z tablicy 2 przygotowano próbki z włóknami prostymi, z haczykowatymi odgięciami oraz faliste o porównywalnej smukłości w zakresie 31-38. Dodatkowo, do próbek wykonanych z SCC zbrojonego włóknami o zbliżonej smukłości, zbadano trzy próbki zbrojone włóknami o smukłości wynoszącej 50 oraz trzy próbki niezbrojone.

Próbki pryzmatyczne o wymiarach 150x150x550 mm przez 24 godziny przechowywano w formach pod folią w wilgotności względnej większej od 90%. Po rozformowaniu próbki umieszczano w wodzie w temperaturze 20°C, gdzie pozostały do czasu badania. Bezpośrednio przed badaniem w połowie długości próbki wykonywano nacięcie o głębokości 25 mm piłą diamentową. Następnie próbki poddawano trzy-punktowemu zginaniu, przy czym odległość podpór wynosiła 500 mm (rysunek 2). Badania prowadzono przy stałym przyroście ugięcia wynoszącym 0,2 mm/min, aż do osiągnięcia ugięcia wynoszącego 5 mm. Równocześnie prowadzono pomiar szerokości rozwarcia rysy.

Tablica 1 / Table 1

SKŁADY MIESZANEK SAMOZAGĘSZCZAJĄCYCH SIĘ, kg/m³

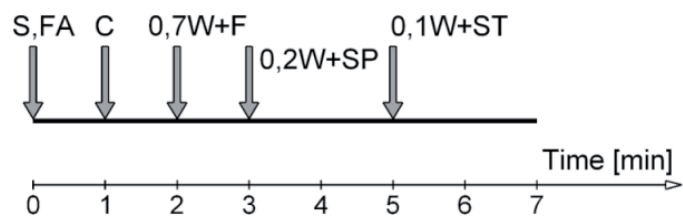
COMPOSITION OF SFR-SCC MIXTURES, kg/m³

Rodzaj włókien/ Type of fibres	Cement CEM II/B-V 32,5R	Piasek Sand 0-2mm	Kruszywo otoczkowe Gravel 2-8 mm	Woda Water	Włókna stalowe Steel fibres	Superplastyfikator Superplasti-cizer	Stabilizator Stabilizer	W/C
	C	S	FA	W	F	SP	ST	-
KrampeHarex DM 6/0,17	490	756	944,4	226,4	40	17	1,6	0,42
Steelbet30/0,8 KrampeHarex DG 12,5/0,4	490	808	808	201	40	17	2	0,42
KrampeHarex SW35, SW50	490	800	800	201	40	12,25	1,96	0,41

150 mm. The span is three times the height of the sample. In this paper, to investigate the behaviour of SFR-SCC beams the methods given in RILEM TC 162-TDF recommendation (9) and in EN 14651 standard were selected. On the basis of obtained results, an analyse was undertaken of SFR-SCC mechanical properties, such as: flexural tensile strength at the limit of proportionality or residual strength.

2. Experimental program

For the tests the samples of self-compacting concrete reinforced with steel fibers were produced (Table 1). In order to obtain adequate workability and stability of the mixes, superplasticizer Glenium SKY 592 and stabilizer RheoMATRIX were used. Total time of concrete mixtures preparation was 7 minutes. Details of the components addition are shown in Fig. 1.



Rys. 1. Przygotowanie mieszanki betonowej

Fig.1. Mixing procedure for SFR-SCC

The volume content of fibres was 0.5% (40 kg/m³) in each case. Among the fibers commercially available, fibers of different shapes were selected, but with similar ratio of length to diameter (slenderness). Samples with straight, hooked and corrugated fibers with the comparable slenderness in the range of 31-38 were tested (Table 2). In addition, to the SCC samples reinforced with fibers of the similar slenderness three samples with slenderness of 50 and three unreinforced samples were tested.-

Prism notched specimens with dimensions of 150 x 150 x 550 mm were tested. After casting the samples were placed in chamber in the air of high humidity, for one day. After demoulding the samples

Tablica 2 / Table 2

RODZAJ STOSOWANYCH WŁÓKIEŃ

PROPERTIES OF STEEL FIBERS

Właściwości/ Properties	KrampeHarex DM 6/0,17	KrampeHarex DG 12,5/0,4	Steelbet 30/0,8	KrampeHarex SW 35	KrampeHarex SW 50
Oznaczenie w tekście Designing	DM6	DG12	HE30	SW35	SW50
Kształt włókien / Shape	proste / straight	proste / straight	z haczykowatymi odgięciami / hooked	faliste / corrugated	faliste / corrugated
Przekrój / Cross section	koło / circle	koło / circle	część okręgu part of circle	część okręgu part of circle	część okręgu part of circle
Długość / Length, mm	6 ± 0,6	12,5 ± 1,25	30 ± 1	35 ± 3,5	50 ± 5
Średnica / Diameter, mm	0,17 ± 0,017	0,40 ± 0,04	0,8 +0,04/-0,03	1,0 ± 0,04	1,0 ± 0,04
l/d	35	31	38	35	50
Wytrzymałość na rozciąganie Tensile strength, MPa	2100 ± 15%	> 1250 ± 15%	1100	800 ± 15%	800 ± 15%

3. Wyniki badań i dyskusja

3.1. Uwagi wstępne

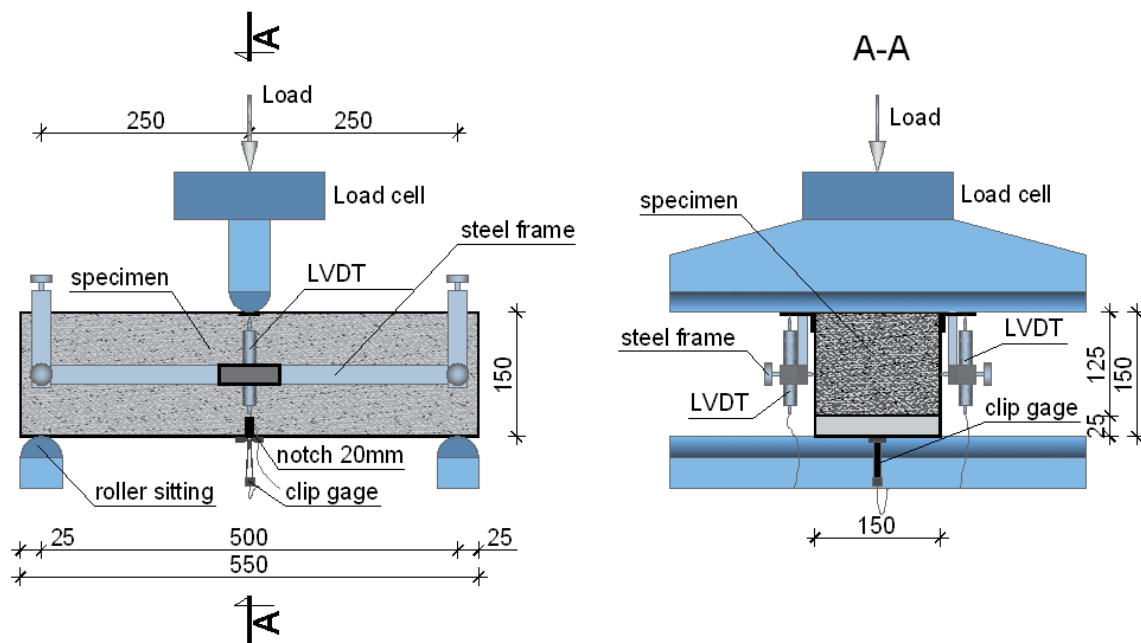
Na rysunku 3 pokazano krzywe zginania belek uzyskane w próbie trzy-punktowego zginania; skład betonu i rodzaj włókien podano w tabelicy 1. Wszystkie krzywe stanowią średnie z trzech próbek. Zastosowano włókna o różnych kształtach, ale o porównywalnej smukłości ($l/d \approx 36$): proste (DM6, DG12), faliste (SW35) i zakrzywione (HE30). Krzywe siła-odkształcenie zostały podzielone na grupy wg typu włókien: proste (DM6, DG12) i zakrzywione (HE30, SW35), jak również na zbiór o większej smukłości (SW50). Wyniki pokazano na tle wyników z badań elementów niezbrojonych (0) oraz zbrojonych włóknami falistymi o większej smukłości (SW50).

were stored in water at 20°C until the examination. Immediately before the test, in the middle of the sample a notch was cut with a diamond saw, with a depth of 25 mm. The notched beams with the span of 500 mm (Fig. 2) were used for fracture tests. During the tests the constant rate of mid-span deflection of 0.2 mm/min was maintained, until reaching the deflection of 5 mm. At the same time, the crack mouth opening displacement (CMOD) was measured.

3. Tests results and discussion

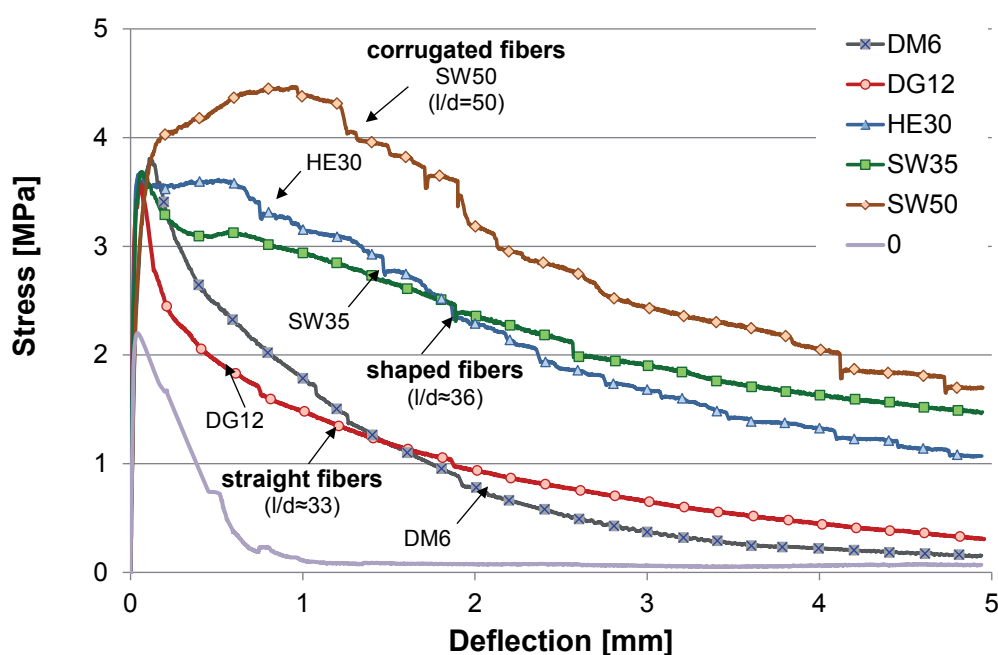
3.1. General remarks

In Fig. 3, the load-deflection curves obtained in the three-point bending tests of SCC specimens reinforced with different types



Rys. 2. Stanowisko badawcze

Fig. 2. Test stand



Rys. 3. Krzywe zginania belek zbrojonych różnymi rodzajami włókien

Fig. 3. Load-deflection curves of three-point bending tests of SCC reinforced with different types of fibers

Można zauważyć, że przy podobnej smukłości włókien zasadniczy wpływ na właściwości mechaniczne betonu w fazie osłabienia materiału ma kształt zastosowanego zbrojenia. Włókna proste nieznacznie poprawiły wytrzymałość betonu w fazie osłabienia w porównaniu z elementami niezbrojonymi. Porównując je do włókien o kształcie haczykowatym bądź falistym wyraźnie widać, że zmiana kształtu włókien znacznie zwiększyła ich wpływ na wytrzymałość. Ogólnie przy tym samym ugięciu próbka zbrojona włóknami zakrzywionymi jest w stanie przetrwać dużo większe obciążenia niż próbka zbrojona włóknami prostymi. Jest to oczywiście związane z dużo lepszym zakotwieniem zakrzywionych włókien stalowych w matrycy cementowej niż włókien prostych.

Można również wnioskować, że skuteczność wpływu zbrojenia rozproszonego wzrasta wraz ze smukłością włókien, co wynika z porównania rezultatów uzyskanych w przypadku zbrojenia o smukłości włókien $l/d = 36$ do włókien o $l/d = 50$.

3.2. Wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu w zakresie proporcjonalności liniowej naprężenie-odkształcenie

Wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu w zakresie prostej proporcjonalności liniowej można wyznaczyć według normy EN 14651:2005+A1:2007(E), stosując wzór:

$$f_{ct,L}^f = \frac{3F_L L}{2b h_{sp}^2}$$

gdzie: F_L – maksymalna siła w przedziale ugięcia $0 \pm 0,05$ mm, L – rozpiętość podpór belki (500 mm), b – szerokość belki (150 mm), h_{sp} – wysokość belki pomniejszona o wysokość szczeliny (125 mm).

of steel fibers, were compared, SFR-SCC composition in Table 1. All curves are the average of three samples. Fibers with different shapes but similar slenderness ($l/d \approx 36$) were used: straight fibers (DM6, DG12), corrugated (SW35) and hooked (HE30). For comparison, the results obtained from the tests of unreinforced beams (0) and reinforced with corrugated, but with higher slenderness fibres (SW50), were also included. The curves are grouped in relation of fibres type i.e. straight (DM6, DG12) and shaped (HE30, SW35) as well as with higher slenderness (SW50). The load-deflection curve for SCC samples without reinforcement was also included.

In Fig. 3 the differences in behaviour of samples with different fibre types are clearly visible. It can be observed

that, in post-peak range of load-deflection curve, for specimens reinforced with fibers of similar slenderness, the significant effect on the mechanical properties of SCC has the shape of used fibres. Straight fibers slightly improved the post-peak parameters of self-compacting concrete in comparison with unreinforced elements. The comparison of SCC samples reinforced with straight and shaped fibers shows that the change in fibers shape significantly increased their impact on SCC properties. Generally, for the same deflection the samples reinforced with shaped fibers are able to transfer much higher load than the SCC reinforced with straight fibers. This is of course associated with a much better anchorage of shaped fibers in cement matrix than straight fibers.

It can be also concluded that the effectiveness of dispersed reinforcement increases with the increase of slenderness of fibers. It is evident from comparison of the load-deflection curves of SCC sample reinforced with fibres having slenderness of $l/d \approx 36$ with specimen to which fibers of $l/d = 50$ were added.

3.2. Flexural tensile strength at the limit of proportionality

Flexural tensile strength at the limit of proportionality can be determined according to EN 14651 standard from the formula:

$$f_{ct,L}^f = \frac{3F_L L}{2b h_{sp}^2}$$

where: F_L – maximum force in the range of deflection 0 ± 0.05 mm, L – span (500 mm), b – beam width (150 mm), h_{sp} – beam height lowered by the depth of the notch (125 mm).

W oparciu o wyniki badań można stwierdzić, że przy tej samej smukłości włókien, ich rodzaj nie miał znacznego wpływu na wytrzymałość fibrobetonu na rozciąganie przy zginaniu $f_{ct,L}^f$. Wytrzymałość uzyskana dla próbek betonowych zbrojonych włóknami o smukłości z zakresu 31÷38 była zbliżona i wynosiła od 3,60 MPa do 3,73 MPa (rysunek 4). Jedynie beton zbrojony najkrótszymi prostymi włóknami osiągał wytrzymałość zbliżoną do próbek niezbrojonych. Zwiększenie smukłości włókien nie spowodowało podwyższenia $f_{ct,L}^f$, a raczej spadek tej wytrzymałości. Stąd wniosek, że kształt włókien nie ma wpływu na wytrzymałość betonu na rozciąganie przy zginaniu w zakresie proporcjonalności liniowej. Należy jednak zaznaczyć, że wytrzymałość określa się dla maksymalnego ugięcia z zakresu 0÷0,05 mm, w którym zakłada się sprężyste odkształcenia betonu. Jak wiadomo, włókna stalowe mają wpływ dopiero na właściwości betonu w fazie osłabienia materiału (6). Stąd, można się było spodziewać niewielkiego wpływu kształtu włókien na tę wytrzymałość, co potwierdzają wyniki Holschemachera i in. (11). Holschemacher i in. (11) i Soulioti (12) uzyskali bardzo zbliżone wartości $f_{ct,L}^f$ dla zawartości objętościowej 0,5% dwóch różnych typów włókien falistych i haczykowatych.

3.3. Wytrzymałość resztkowa na zginanie

Wytrzymałość resztkowa na zginanie jest umownym maksymalnym naprężeniem rozciągającym, przy założonym ugięciu bądź rozwarciu krawędzi naciętej szczeliny, – według instrukcji Rilem (9) lub normy EN 14651. Można ją obliczyć ze wzoru [1] przy założeniu, że siła ($F_{R,i}$) jest siłą odpowiadającą ugięciu (rysunek 5) bądź rozwarciu krawędzi naciętej szczeliny, gdyż badania beleczek z karbem można przeprowadzać kontrolując szybkość ich ugięcia lub szybkość wzrostu rozwarcia naciętej szczeliny (9). W przypadku regulowania szybkości ugięcia wytrzymałość resztkową należy określać dla ugięć wyznaczonych według rysunku 5a. Kiedy podczas badania steruje się szybkością rozwarcia naciętej szczeliny $f_{R,i}$ powinno się ją określać według rysunku 5b.

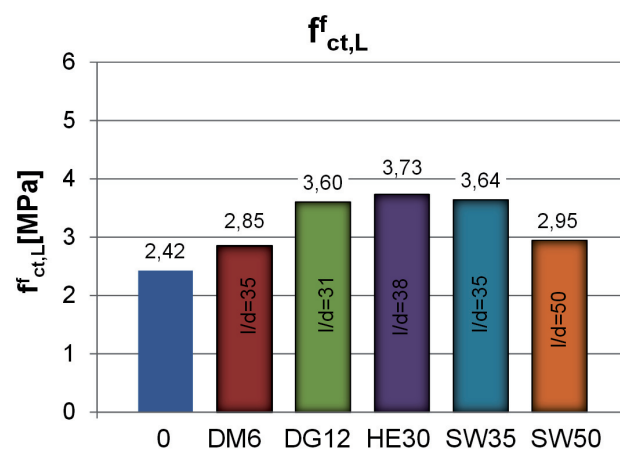
Autorzy przeprowadzili badania laboratoryjne utrzymując stały przyrost ugięcia w czasie. Stąd, zamieszczone obliczenia naprężeń są wykonane dla odpowiedniej wartości ugięć. Rozwarcie krawędzi naciętej szczeliny wyznaczone wg (9) i EN 14651 równe 0,5 mm odpowiada stanowi granicznemu użytkowania, a równe 2,5 mm stanowi granicznemu nośności (13). Dlatego, wytrzymałość resztkową $f_{R,1}$ i $f_{R,3}$ wyznaczono dla ugięć odpowiadających podanym wartościom CMOD czyli: 0,46 mm i 2,15 mm. Wpływ rodzaju włókien na omawiane wytrzymałości przedstawiono na rysunku 6. Jak już wcześniej podano, włókna haczykowate lub faliste miały większy wpływ na właściwości betonu niż włókna proste, co można zaobserwować na rysunku 6. Zmiana kształtu włókien z prostego na zakrzywiony spowodowała zwiększenie wytrzymałości resztkowej $f_{R,1}$ o około 50%, a $f_{R,3}$ aż o 270% w stosunku do elementów zbrojonych włóknami prostymi. Dla porównania przedstawiono wyniki badań belek zbrojonych najdłuższymi włóknami o największej smukłości (SW50). Jak można było oczekiwać, ten rodzaj zbrojenia okazał się najbardziej efektywny i zwiększył $f_{R,1}$ o ponad 80%, a $f_{R,3}$ o 350% w stosunku do elementów zbrojonych włóknami prostymi.

Analyzing the experimental results it can be stated that for the comparable fibers slenderness, their type had no significant effect on $f_{ct,L}^f$ of SFR-SCC. The $f_{ct,L}^f$ of samples from self-compacting concrete reinforced with fibers of slenderness in the range of 31÷38 was similar and ranged from 3.60 MPa to 3.73 MPa (Fig.4). Only the beams made of SCC reinforced with the shortest straight fibers have shown the $f_{ct,L}^f$ similar to unreinforced ones. The increase of fibers slenderness did not result in the increase of $f_{ct,L}^f$, but rather the effect was opposite i.e. decreasing this $f_{ct,L}^f$. Therefore, fibers shape does not affect flexural tensile strength at the limit of proportionality. However, it should be noted, that this strength is determined for the peak load or the highest load in the interval of deflection 0÷0.05 mm, where the elasticity of material is assumed. As it is known, steel fibers affect only the post-peak parameters of concrete (6). Therefore, the low effect of fibers shape on $f_{ct,L}^f$ of SCC should be expected, which is confirmed by Holschemacher et al. (11) and Soulioti et al. (12). These authors obtained very similar results of $f_{ct,L}^f$ for the volume content of 0.5% of two different types of fibers, corrugated and hooked.

3.3. Residual tensile strength

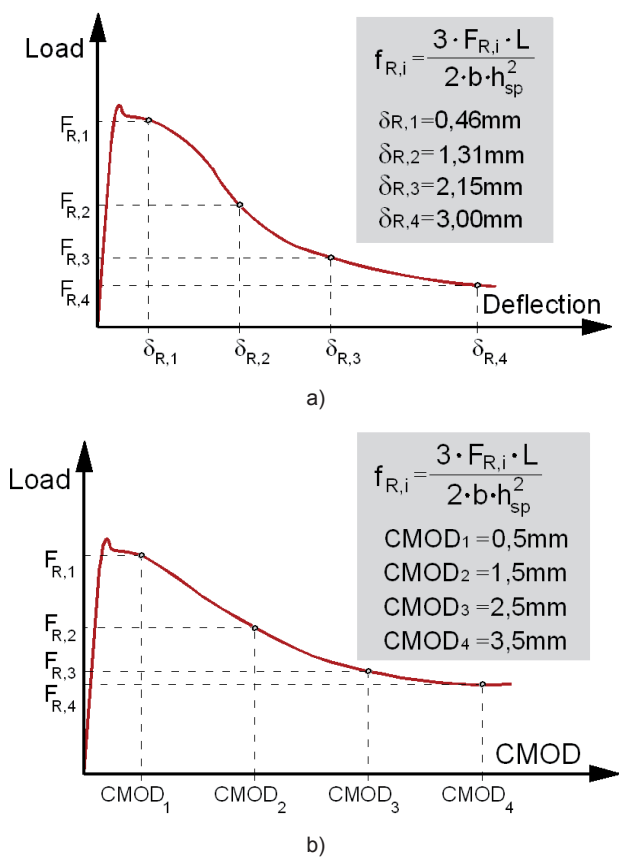
Residual tensile strength is the conventional maximum tensile strength, at the assumed deflection or CMOD, which can be calculated according to RILEM TC 162-TDF recommendation (9) or standard EN 14651 from the formula [1], assuming that the strength ($F_{R,i}$) is the strength corresponding to given deflection or CMOD (Fig. 5). The analysis of beams with the notch can be performed by controlling the rate of the mid-span deflection or rate of CMOD displacement as given in (9) and EN 14651. In the case of the control of rate of deflection, the residual strength should be determined for deflections shown in Fig. 5a. When the test is controlled by rate of CMOD displacement, $F_{R,i}$ should be determined for CMOD shown in Fig. 5b.

The authors carried out laboratory tests with a constant rate of deflection. Hence, the strength calculations are made for the respective values of deflections. The CMOD equal to 0.5 mm corresponds to the limit state of utilization, and CMOD = 2.5 mm to



Rys. 4. Wpływ rodzaju włókien na wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu

Fig. 4. The effect of fibers type on flexural tensile strength at the limit of proportionality



Rys. 5. Określenie resztkowej wytrzymałości na zginanie $f_{R,i}$ z zależności: a) siła-ugięcie; b) siła – ugięcie według ASTM C1018

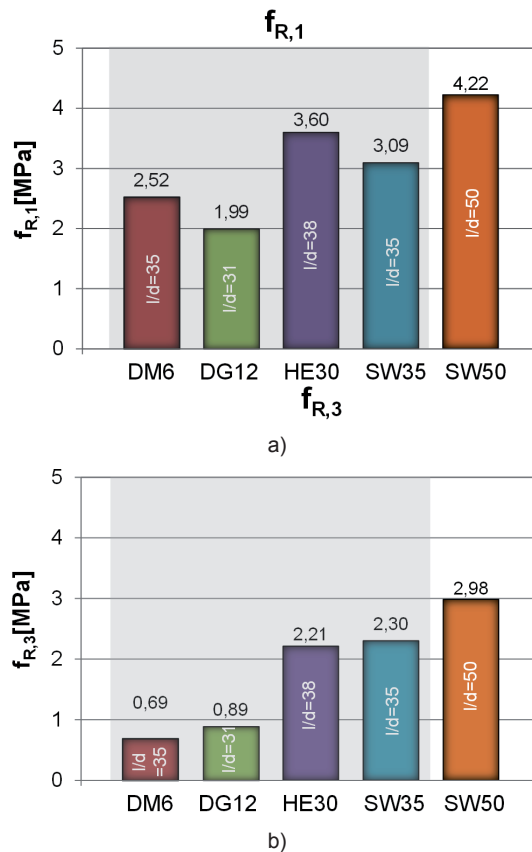
Fig. 5. Determination of residual tensile strength $f_{R,i}$ from the dependency: a) load – deflection; b) load – CMOD curves

Uzyskane wyniki doświadczeń porównano z badaniami przedstawionymi przez Giaccio (14) oraz Hameeda (15) (rysunek 7). Badania Giaccio dotyczyły włókien haczykowatych o różnej smukłości. Z kolei badania Hameeda (15) obejmowały dwa typy włókien prostych i haczykowatych, o różnej smukłości.

Porównanie wyników badań wykazuje, że wraz ze wzrostem smukłości wzrasta wytrzymałość resztkowa. Jednak, wyraźnie widać, że przy tej samej smukłości włókna o kształcie haczykowatym mają większą wytrzymałość resztkową $f_{R,3}$ niż włókna proste. Różnica ta nie jest już tak widoczna w przypadku wytrzymałości $f_{R,1}$.

3.4. Energia zniszczenia

Energia zniszczenia jest to pole powierzchni pod krzywą zależności siła-ugięcie. W niniejszej pracy określono energię zniszczenia dla ugięcia belki wynoszącego $L/150 = 3,33$ mm. Na rysunku 8 przedstawiono wpływ kształtu włókien na energię zniszczenia. Belki zbrojone włóknami o kształcie haczykowatym lub falistym wykazywały dwa razy większą energię zniszczenia niż belki z włóknami prostymi. Jednak różnica zmierzonej energii zniszczenia w przypadku tych dwóch rodzajów włókien nie była duża. W pracach Holschemachera i in. (11) oraz Soulioti i in. (12) uzyskano znacznie mniejszą energię zniszczenia w przypadku próbek zbrojonych włóknami falistymi niż o kształcie haczykowatym, przy ich podobnej smukłości. Badania te (11, 12) dotyczyły próbek bez



Rys. 6. Wpływ rodzaju włókien na wytrzymałość resztkową a) $f_{R,1}$; b) $f_{R,3}$

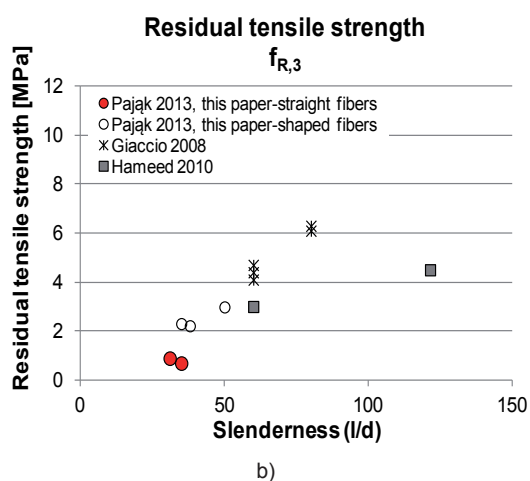
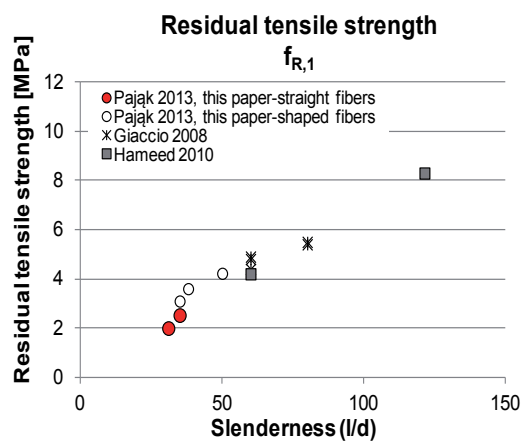
Fig. 6. The effect of the fibers type on residual strengths: a) $f_{R,1}$; b) $f_{R,3}$

the limit state of load capacity (13). The residual strengths $f_{R,1}$ and $f_{R,3}$ are determined for deflections corresponding to given values of CMOD, that is: 0.46 mm and 2.15 mm. The effect of the type of fibers on discussed strength is shown in Fig. 6.

As it was mentioned previously, shaped (hooked, corrugated) fibers appeared to have higher impact than straight fibers, which can be seen in presented diagrams (Fig. 6). The change of fibers shape from straight to shaped caused the increase of residual strength $f_{R,1}$ of about 50%, and $f_{R,3}$ even of about 270% in relation to elements reinforced with straight fibers. For comparison, the results for beams reinforced with the longest fibers of the highest slenderness (SW50) were presented. As expected, such reinforcement was the most effective and increased $f_{R,1}$ of about 83%, and $f_{R,3}$ of about 350%, in relation to elements reinforced with straight fibers.

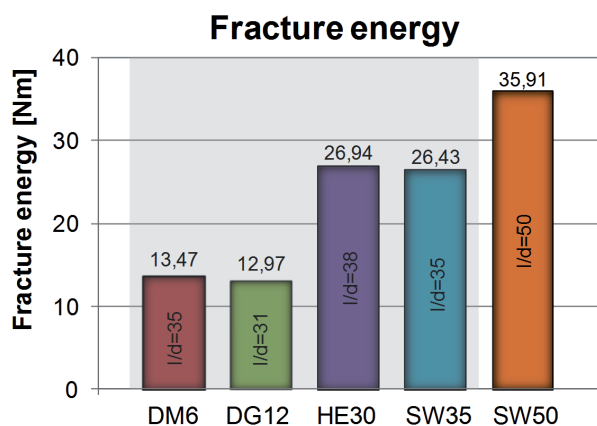
The test results were compared with the results presented by Giaccio et al. (14) and Hameed et al. (15) (Fig.7). The Giaccio et al.(14) research related to hooked fibres, but with different slenderness. The research presented by Hameed et al. (15) were performed on two types of fibers – straight and hooked, with different slenderness.

The comparison of test results shows that the increase in slenderness, is accompanied with the increase of residual tensile strength. However, it is clear that at the same slenderness, concrete beams with hooked fibers achieved higher residual tensile strength $f_{R,3}$ than with straight fibers. Such difference is not so evident in the case of $f_{R,1}$.



Rys. 7. Wpływ rodzaju włókien na wytrzymałość resztkową a) $f_{R,1}$; b) $f_{R,3}$

Fig. 7. The effect of the fibers type on residual tensile strength: a) $f_{R,1}$; b) $f_{R,3}$



Rys. 8. Wpływ rodzaju włókien na energię zniszczenia

Fig. 8. The effect of fibers type on fracture energy

nacięć zginanych dwupunktowo. Być może różnice w wynikach wynikają z różnic w metodach badawczych.

W opisanych doświadczeniach badane są próbki zawierające 0,5% objętościowego zbrojenia. Przy większej zawartości włókien ich kształt ma również wpływ na siłę maksymalną (6, 16). Przy zastosowaniu 40 kg/m³ zbrojenia rozproszonego siła maksymalna w zakresie ugięcia wynoszącego 5 mm jest prawie identyczna, bez

3.4. Fracture energy

Fracture energy is an area under the load-deflection curve – measured for a given deflection. In this work, fracture energy for beams deflection of $L/150=3.33$ mm was measured. Figure 8 shows the effect of fibers shape on fracture energy. Concrete beams reinforced with hooked or corrugated fibres showed two times higher fracture energy than beams with straight fibers. However, the difference of measured fracture energy between these two types of fibers was not very significant. In the works of Holschemachera et al. (11) and Soulioti et al. (12) the fracture energy was much lower for samples reinforced with corrugated fibres than with hooked ones, at their similar slenderness. These studies (11, 12) were concerning the samples without notch, tested according to ASTM C 293 i.e. applying center-point loading.

As aforementioned the tests were performed on samples with 0.5% volume content of the fibres. At higher reinforcement degree, the shape of fibers also effects the maximum strength (6, 16). When the content of fibres equals 40 kg/m³, the maximum strength is also the same regardless the slenderness of fibers. Thus, at higher degree of reinforcement the shape of fibers should have even higher effect on fracture energy.

Moreover, the increase of corrugated fibers slenderness caused the increase of fracture energy of about 2.7 times in comparison to fracture energy for SCC elements with straight fibers. There are in literature the studies on the effect of fibers slenderness, of unchanged shape, on fracture energy. Banthia et al. (17) and Nataraja et al. (18) examined the concrete samples reinforced with corrugated fibers, but with different slenderness. From the studies of Banthia et al. (17) it may be concluded that fracture energy does not depend on fibers slenderness. However, Nataraja et al. (18) have clearly shown that the fracture energy is increasing with the rise of fibers slenderness. Then the research results presented in this paper are consistent with the results of Nataraja et al (18).

4. Conclusions

From the test results of self-compacting concrete, reinforced with steel fibers of different shapes, in the quantity of 40 kg/m³, the following conclusions can draw:

- The maximum load that was able to transfer SCC samples does not depend of the shape of steel fibers, at their similar slenderness. The effect of fibers shape was evident only in the post-peak behaviour of tested beams;
- There were no significant changes of flexural tensile strength at the limit of proportionality with the change in fibers shape, confirming the lack of the effect of fibers on the behaviour of self-compacting concrete in the elastic state;
- In the post-peak region of the load-deflection curve, the straight fibers were much less effective than hooked or corrugated fibers. A significant increase of flexural residual strength $f_{R,3}$ with the change of fibers shape from straight to hooked or corru-

względu na kształt włókien. Stąd, przy większym stopniu zbrojenia może się okazać, że kształt włókien ma jeszcze większy wpływ na energię zniszczenia.

Ponadto, zwiększenie smukłości włókien falistych spowodowało prawie trzykrotne (2,7 x) zwiększenie energii zniszczenia w stosunku do wyników uzyskanych w badaniach elementów z włóknami prostymi. W literaturze można znaleźć opracowania dotyczące wpływu smukłości włókien, przy ich niezmiennym kształcie, na energię zniszczenia. Na przykład Banthia (17) i Nataraja (18) badali próbki zbrojone włóknami o kształcie falistym o różnej smukłości. Z badań Banthii (17) wynika, że energia zniszczenia nie zależy od smukłości włókien. Z kolei praca Nataraja wyraźnie wskazuje na wzrost energii zniszczenia wraz ze wzrostem smukłości włókien. Uzyskane w tej pracy wyniki doświadczeń są więc zgodne z wynikami Nataraja (18).

4. Wnioski

Wyniki badań betonu samozagęszczającego się, zbrojonego włóknami stalowymi w ilości 40 kg/m³, o różnych kształtach, pozwalają na wyciągnięcie następujących wniosków:

- Maksymalne obciążenie jakie mogły przenieść badane beleczki nie zależy od kształtu stosowanych włókien stalowych, przy ich podobnej smukłości. Wpływ kształtu włókien uwidaczniał się dopiero w fazie osłabienia materiału.
- Nie odnotowano wyraźnych zmian wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu w zakresie proporcjonalności liniowej wraz ze zmianą kształtu włókien, co potwierdza brak wpływu włókien na zachowanie betonu samozagęszczającego się w zakresie sprężystym.
- W fazie osłabienia materiału włókna proste miały dużo mniejszy wpływ niż włókna haczykowane bądź faliste. Uzyskano znaczne zwiększenie wytrzymałości resztkowej na zginanie $f_{R,3}$ wraz ze zmianą kształtu włókien, o podobnej smukłości, z prostych na haczykowane bądź faliste. Wytrzymałość na rozciąganie $f_{R,1}$ w mniejszym stopniu zależała od kształtu włókien.
- Zastosowanie włókien o kształcie falistym bądź haczykowanym znacznie zwiększyło energię zniszczenia badanych beleczek betonowych.
- Wraz ze zwiększeniem smukłości włókien zwiększało się maksymalne obciążenie próbki, wytrzymałość resztkowa oraz energia zniszczenia badanych kształtek.

gated, but with similar slenderness, was found. The strength $f_{R,1}$ is less depending of the fibers shape;

- The application of hooked or corrugated fibers significantly increased the fracture energy of SCC elements;
- The rise of fibers slenderness caused the increase of the maximum load, as well as the residual strength and fracture energy of SCC elements.

Literatura / References

1. E. N. B. Pereira, J. A. O. Barros, A. Camões, Steel Fiber-Reinforced Self-Compacting Concrete: Experimental Research and Numerical Simulation. *Journal of Structural Engineering*, **134**, 1310-1321 (2008).
2. V. M. C. F. Cunha, J. A. O. Barros, J. M. Sena Cruz, Tensile behavior of steel fiber reinforced self-compacting concrete. SP-274-4 Fiber Reinforced Self-Consolidating Concrete: Research and Applications, ACI Committees 544 and 237:51-68.
3. J. Cai, H. Jiang, Y. Zhu, D. Wang, Mechanical properties of fiber reinforced self-compacting concrete. *Optoelectronics and advanced materials – rapid communications*, **4**, 1013-1016 (2010).
4. C. I. Goodier, Development of self-compacting concrete. *Proceedings of the ICE – Structur. Build.*, **56**, 405-414 (2003) .
5. J. Katzer, J. Domski, Quality and mechanical properties of engineered steel fibres used as reinforcement for concrete, *Constr. Build. Mat.*, **34**, 243–248 (2012).
6. P. J. Hannant, *Fibre cements and fibre concretes*. New York: Wiley&Sons, New York 1978.
7. T. Ponikiewski, Reologiczne i mechaniczne właściwości betonów samozagęszczalnych z włóknami stalowymi, *Cement Wapno Beton*, **79**, 301 – 309 (2012).
8. M. Pająk, T. Ponikiewski, Flexural behaviour of self-compacting concrete reinforced with different types of steel fibers. *Constr. Build. Mat.*, **47**, 397-408, (2013).
9. RILEM TC 162-TDF. Test and design methods for steel fibre reinforced concrete, Final recommendations. *Mat. and Struct./Mat. et Constr.*, **35**, 579-582 (2002).
10. Japan Society of Civil Engineers, Method of Test for Flexural Strength and Flexural Toughness of Fiber Reinforced Concrete. Standard SF-4, 58-66 (1984).
11. K. Holschemacher, T. Mueller, Y. Ribakov, Effect of steel fibers on mechanical properties of high-strength concrete. *Materials and Design*, **31**, 2604-2615 (2010).
12. D. V. Soulioti, N. M. Barkoula, A. Paipetis, T. E. Matikas, Effects of Fiber Geometry and Volume Fraction on the Flexural Behaviour of Steel-Fibre Reinforced Concrete. *Intern. J. for Exper. Mechan.*, **47**, 535-541 (2011).
13. M. Di Prisco, G. Plizzari, L. Vandewalle, Fiber reinforced concrete: new design perspectives. *Mat. Struct.*, **42**, 1261-1281 (2009).
14. G. Giaccio, J. M. Tobes, R. Zerbino, Use of small beams to obtain design parameters of fibre reinforced concrete. *Cem. Concr. Comp.*, **30**, 297-306 (2008).
15. R. Hameed, A. Turatsinze, F. Duprat, A. Sellier, Study on the flexural properties of metallic-hybrid-fibre-reinforced concrete. *Maejo Intern. J. Scien. Techn.*, **4**, 169-184 (2010).
16. 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. *Constr. Build. Mat.*, **25**, 4144-4155 (2011).
17. N. Banthia, M. Sappakittipakorn, Toughness enhancement in steel fiber reinforced concrete through fiber hybridization, *Cem. Concr. Res.*, **37**, 1366-1372 (2007).
18. M. C. Nataraja, N. Dhang, A. P. Gupta, Toughness characterization of steel fiber-reinforced concrete by JSCE approach. *Cem. Concr. Res.*, **30**, 593-597 (2000).