

## **Reologiczne i mechaniczne właściwości betonów samozagęszczalnych z włóknami stalowymi**

### **The rheological and mechanical properties of steel fibres reinforced self compacting concrete**

#### **1. Wprowadzenie**

Analiza wpływu włókien na samozagęszczalność i mechaniczne właściwości betonu jest jednym z nowych obszarów w badaniach kompozytów cementowych (1, 2). Zasadniczą wadą betonu samozagęszczanego z dodatkiem włókien stalowych (BSZWS) jest gorsza urabialność. Dlatego urabialność betonów samozagęszczających się z dodatkiem włókien stalowych, jak również wpływ włókien na właściwości betonu świeżego i stwardniałego, powinny być dobrze rozpoznane. Projektowanie mieszanek samozagęszczających się nie jest prostym zadaniem; każda, nawet niewielka, zmiana zawartości składników, zmienność materiałów i warunki dojrzewania, mogą wpłynąć na produkcję betonu o różnych właściwościach. Płynność, zdolność do przepływu pomiędzy prętami zbrojeniowymi, a także odporność na segregację są głównymi parametrami, które mogą ulec zmianie (3).

Dotychczasowe badania w zakresie losowego rozmieszczenia włókien stalowych w BSZWS nie dostarczają systematycznych danych eksperymentalnych stwarzających możliwość ich projektowania w celu zapewnienia założonych parametrów mechanicznych, jak również dla uzyskania zakładanego rozmieszczenia i orientacji zbrojenia rozproszonego (4-6). Prowadzi to do występowania rozbieżności między zaprojektowanymi i uzyskanymi właściwościami mechanicznymi betonów (7, 8). Ważne jest, aby określić stopień zmienności właściwości mechanicznych BSZWS, spowodowanych rozmieszczeniem i orientacją zbrojenia rozproszonego (9-11). Inne badania potwierdziły zmienność orientacji włókien stalowych w BSZ, w trakcie procesów technologicznych (9, 12-14). Również w przypadku wzmacniania włóknami klasycznych betonów, pojawiają się problemy związane z trudnościami technologicznymi podczas ich produkcji, co również wpływa na właściwości elementów betonowych (15-17). Niezbędne jest rozpoznanie prawdziwej natury urabialności oraz efektu dodania włókien do BSZ na właściwości świeżych i stwardniałych kompozytów cementowych.

#### **1. Introduction**

Analysis of the influence of fibres on the self compacting and mechanical properties of concrete is one of the new field in investigations of cement composites (1, 2). The general disadvantage of self compacting concrete properties with fibre addition is the lower workability. Therefore the workability of Steel Fibres Reinforced Self Compacting Concrete SFRSCC as well as the effect of fibres on the properties of fresh and hardened concrete should be well recognized. The SCC mix design is not a simple task; each, even slight, changes of components content, variable materials and curing conditions, can result in manufacturing of concrete with different properties. Fluidity, ability to flow between the reinforcing bars as well as the resistance to segregation are the main parameters which can change (3).

The previous studies on random distribution of steel fibres in SFRSCC have not provided systematic experimental data to enable their design for assumed mechanical parameters as well as to obtain the assumed distribution and orientation of the dispersed reinforcement (4-6). This causes the discrepancy between the designed and obtained mechanical parameters of the modified concretes (7, 8). It is important to determine the degree of variation in the mechanical properties of SFRSCC, caused by the location and orientation of the dispersed reinforcement (9-11) Other studies have confirmed the variable orientation of steel fibres in SCC, during technological processes (9, 12-14). Also in the case of fibre reinforced classic concrete problems appear as technological difficulties during its production as well as the influence on properties of concrete elements (15-17). Recognition of the real nature of workability and of the effect that added fibres have on the properties of fresh and hardened cement composites are needed.

The important problem is the uneven distribution of fibres in the volume of hardened concrete which is indicated in the literature (9, 10, 15). Other studies have also shown the effect of the dimensions of concrete elements on the direction of fibres distribution.

Ważnym problemem jest nierównomierne rozmieszczenie włókien w objętości stwardniałego betonu, co jest podnoszone w literaturze (9, 10, 15). Inne badania wykazały również wpływ wymiarów elementów betonowych na kierunek ułożenia włókien. Sytuacja ta powoduje pewne problemy podczas procesu technologicznego, związane z losowością rozkładu włókien w objętości betonu.

Podstawowym problemem w przypadku betonów nowej generacji, w tym zawierających włókna, jest ich urabialność. Z licznych badań, które rozpatrywały urabialność mieszanki wydaje się, że zachowuje się ona pod obciążeniem jako ciało lepko-plastyczne Bingham. Granica płynięcia  $g$  oraz lepkość plastyczna  $h$ , zwane parametrami reologicznymi, są stałymi materiałowymi, charakteryzującymi właściwości reologiczne mieszanki. Kiedy naprężenia przekraczają granicę płynięcia, mieszanka zaczyna płynąć z prędkością proporcjonalną do lepkości plastycznej. Im mniejsza lepkość plastyczna mieszanki, tym większa będzie prędkość płynięcia przy danym obciążeniu. Przyjmuje się, że wartości granicy płynięcia  $g$  odpowiada średnica maksymalnego rozplywu SF, natomiast wartości lepkości plastycznej  $h$  odpowiada czas przepływu do osiągnięcia średnicy 500 mm  $T_{500}$ . Oba parametry są mierzone metodą rozplywu (klasa rozplywu KR) zgodnie z normą EN 12350-8:2009.

Problem dodawania włókien stalowych do BSZ, wpływający na pogorszenie urabialności, a nawet całkowitą utratę samozagęszczalności z jednej strony i wzrost wytrzymałości betonu na ściskanie z drugiej strony, jest omawiany w tej pracy w oparciu o materiał doświadczalny. Rozpatrywano właściwości mieszanki betonowej modyfikowanej włóknami stalowymi o różnej długości i różnym udziale objętościowym. Urabialność mieszanek wzmocnionych włóknami stalowymi badano przy użyciu reometru do badań mieszanek betonowych Viscomat XL. Wyniki pomiarów reologicznych aproksymowano dwuparametrowym modelem reologicznym Bingham. Wykonywano również badania wytrzymałości na zginanie i ściskanie BSZWS.

## 2. Metody badań

Parametry reologiczne świeżej zaprawy i mieszanki betonowej mogą być mierzone za pomocą dwupunktowego reometrycznego pomiaru urabialności (RPU), poprzez zastosowanie zmiennej obrotowej prędkości ścinania i pomiaru otrzymywanej granicy płynięcia. Ze względu na właściwości reologiczne mieszanek betonowych, pomiary powinny być przeprowadzane dla co najmniej dwóch prędkości ścinania. Parametry reologiczne są wyznaczane metodą regresji liniowej zgodnie z równaniem:

$$T = g + N \cdot h \quad [1]$$

gdzie:  $T$  jest oporem ścinania stawianym przez próbkę mieszanki odkształceniu wywołanemu ustalonymi, co najmniej dwoma różnymi prędkościami obrotowymi  $N$  sondy lub naczynia pomiarowego reometru;  $g$  (Nmm) i  $h$  (Nmms) są parametrami odpowiadającymi odpowiednio granicy płynięcia  $\tau_0$  i lepkości plastycznej

This situation brings about some problems during technological process, linked with the randomness of fibre distribution in the volume of concrete.

The basic problem of the new generation of concretes, including those containing fibres, is their workability. From the numerous studies which considered the workability of mixture it appears that its behaviour under load is as viscous-plastic Bingham body. The yield stress value  $g$ , plastic viscosity  $h$ , called the rheological parameters are material constants, governing the rheological properties of the mixture. Once the stress exceeds the yield stress value, the mixture will flow with the speed proportional to the plastic viscosity. The lower the plastic viscosity of the mixture, the higher will be the velocity of flow at a given load. It is assumed that yield stress value  $g$  corresponds to the diameter of the maximum Slump-flow SF, while the plastic viscosity  $h$  flow time is linked with the diameter of 500 mm  $T_{500}$ . Both parameters were measured according to the standard EN 12350-8:2009.

The problems of the addition of steel fibres to Self Compacting Concrete, namely the deterioration of workability, or even a complete loss of self compatibility from one side and an increase in compressive concrete strength on the other, is discussed in this paper on experimental basis. The properties of concrete mixture modified with steel fibres of various length and their different addition were examined. Principally the workability of fibre reinforced mixes with the rheometer for concrete mixes Viscomat XL was tested. For the approximation of the obtained results two-parameter Bingham rheological model was applied. The flexural and compressive strengths of SFRSCC were measured as well.

## 2. Methods

Rheological parameters of fresh mortar and concrete, can be measured using Two Point Workability Test (TPWT), by applying a given shear rate and measuring the resulting shear stress. Because of the nature of the rheological behaviour of the mixtures, the measurements should be taken at least for two considerably different shear rates. The rheological parameters are determined by regression analysis according to the relation:

$$T = g + N \cdot h \quad [1]$$

where  $T$  is the shear resistance of a sample measured at rotation rate  $N$ ;  $g$  (Nmm) and  $h$  (Nmms) are constants corresponding respectively to the yield stress value  $\tau_0$  and plastic viscosity  $\eta_{pl}$ . By suitable calibration of the rheometer, it is possible to express  $g$  and  $h$  in fundamental units. The principles of TPWT and rheological properties of fresh cement mortars and concretes are presented in literature (18). The uniformity of distribution of steel fibres has been studied in SFRSCC moulded as bars, with dimensions of 600 x 150 x 150 mm.





Tablica 1 / Table 1

SKŁADY BSZWS MIESZANEK BETONOWYCH Z WŁÓKNAMI STALOWYMI  
COMPOSITION OF SFRSCC MIXTURE

Składnik / Component	Oznaczenie / Designation	Zawartość / Content, kg/m <sup>3</sup>
CEM I 42.5 R	C	490
Piasek / Sand 0–2 mm	S	756
Kruszywo otoczkowe / Aggregate 2–8 mm	B	944.4
Woda / Water	W	226.4
Włókna stalowe – kg/m <sup>3</sup> (objętościowo) Steel fibres – kg/m <sup>3</sup> (% by volume)	F	20 – 180 (0.25 – 2.25)
Superplastyfikator Glenium ACE 48 (3.5 % m.c.) Superplasticizer Glenium ACE 48 (3.5 % m.c.)	SP	17
Stabilizator RheoMatrix (0.4 % m.c.) Stabilizer RheoMatrix (0.4 % m.c.)	ST	1.6
W/C	-	0.42
Klasa konsystencji (SF) / Slump-flow (SF)	-	SF3

Tablica 2 / Table 2

CHARAKTERYSTYKA WŁÓKIEN STALOWYCH  
PROPERTIES OF STEEL FIBRES

Nazwa Name	Długość Length (mm)	Średnica Diameter (mm)	Przekrój poprzeczny Cross-section	Kształt Shape	Materiał Material	Wytrzymałość na rozciąganie Tensile strength (N/mm <sup>2</sup> )
DM 6/0.17	6±10%	0.17±10%	okrągły round		Stal niskowęglowa low-carbon steel	2100±15%
DG 12.5/0.4	12.5±10%	0.40±10%	okrągły round		Stal niskowęglowa low-carbon steel	1250±15%
KE 20/1.7	20±10%	1.70±10%	prostokątny rectangular		DC01	770±15%
ST 30/0.5	35±10%	2.30±2.95	część okręgu part of circle		Stal niskowęglowa low-carbon steel	800±15%

$\eta_{pl}$ . Poprzez odpowiednią kalibrację reometru, możliwe jest wyrażenie  $g$  i  $h$  w jednostkach fizycznych. Zasady RPU i właściwości reologiczne świeżych zapraw cementowych i betonów przedstawiono w literaturze (18). Jednorodność rozkładu włókien stalowych badano w BSZWS formowanych jako belki o wymiarach 600 x 150 x 150 mm.

### 3. Materiały

Skład badanych BSZWS podano w tablicy 1. W badaniach stosowano cztery rodzaje włókien stalowych (tablica 2, rysunek 1). Jak wynika z tablicy 1, zastosowano superplastyfikator na bazie eteru polikarboksylianowego. Kryterium samozagęszczalności spełniały wszystkie badane mieszanki, zgodnie z przyjętą metodą mieszania (rysunek 2). Włókna zostały wybrane ze stosunkowo dużej grupy dostępnych na rynku. Istotą wyboru było określenie efektywności włókien o różnej geometrii na urabialność mieszanek samozagęszczalnych. Szczegółowe wyniki badań przedstawiono dla mieszanek, w których zawartość włókien wynosiła 0,5 do 2,25% (40 do 180 kg/m<sup>3</sup>). Samozagęszczalność była oceniana na podstawie pomiaru czasu i średnicy rozplywu badanych żółkiem Abramsa oraz w oparciu o parametry reologiczne.

### 3. Materials

The composition of SFRSCC is shown in Table 1. Four types of steel fibres were used in the study (Table 2, Fig. 1). As it is shown in this table two superplasticizers were used based on polycarboxylic ether. The self compacting behaviour was met by all tested concretes, according to adopted mixing procedure (Fig. 2). Fibres were chosen from a relatively large group of all available on the market. The

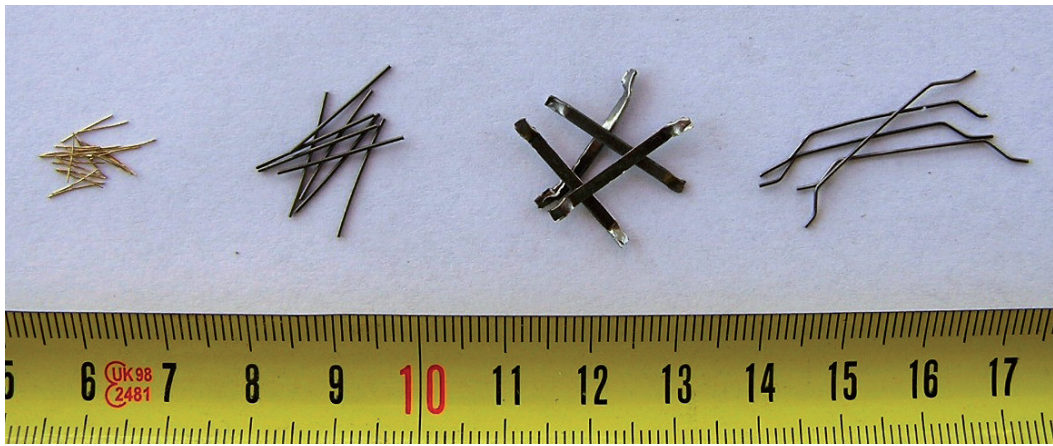
principle of selection was the effect of fibres with various geometry on the workability of self compacting mixtures. The presented results are concerning the samples with the fibre content 0.5 to 2.25% (40 to 180 kg/m<sup>3</sup>). The self compacting behaviour was verified by the time and flow diameter measurements with Abrams cone as well as by the rheological parameters determination.

A procedure for the preparation of concrete mixes was implemented which allowed for maintaining the technological reproducibility of the results. The sequence applied during the preparation of concrete mixes are presented in Figure 2.

The uniformity of distribution of steel fibres in SFRSCC moulded as bars with dimensions of 600 x 150 x 150 mm has been studied. The 200 kN servo-controlled actuator was used for static flexural strength and three point test was applied. At least two samples were tested for each combination of fibres.

### 4. Workability and rheological properties

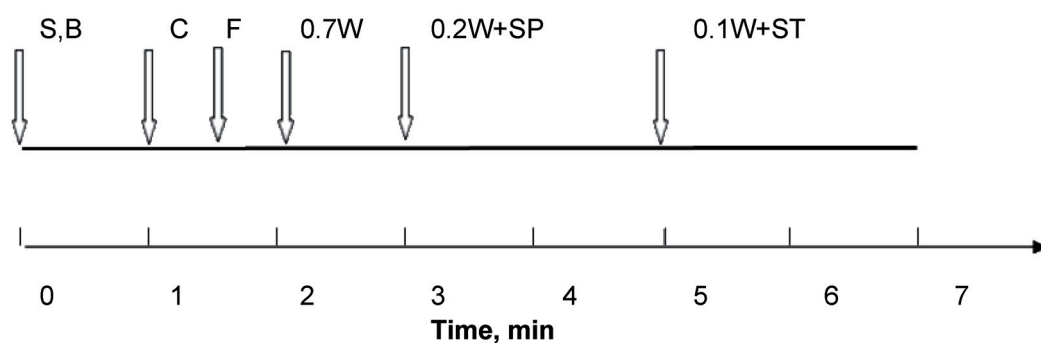
Figure 3 shows the effect of the type and volume ratio of steel fibres on the flow diameter and time  $T_{500}$  of SFRSCC mixtures. Based on



Rys. 1. Włókna stalowe: DM 6/0,17 ; DG 12,5/0,4 ; KE 20/1,7 ;ST 30/0,5

Fig. 1. Steel fibres: DM 6/0.17 ; DG 12.5/0.4 ; KE 20/1.7 ;ST 30/0.5

Opracowano i zastosowano metodę przygotowania mieszanek betonowych, pozwalającą na zachowanie technologicznej powtarzalności wyników. Sekwencję postępowania podczas przygotowywania mieszanek betonowych przedstawiono na rysunku 2.



Rys. 2. Tok postępowania w trakcie mieszania BSZWS

Fig. 2. Mixing procedure of SFRSCC

Jednorodność rozkładu włókien stalowych w BSZWS badano w belkach o wymiarach 600 x 150 x 150 mm. Do

badania statycznej wytrzymałości na zginanie i trzy punktowego jej pomiaru została zastosowana automatyczna maszyna testująca 200 kN. Dla każdej kombinacji włókien były badane co najmniej dwie próbki.

#### 4. Urabialność i właściwości reologiczne

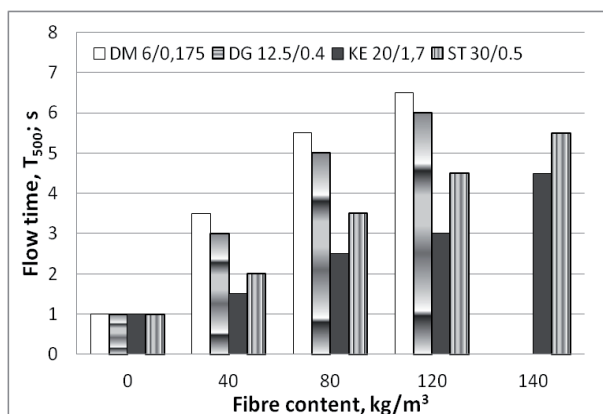
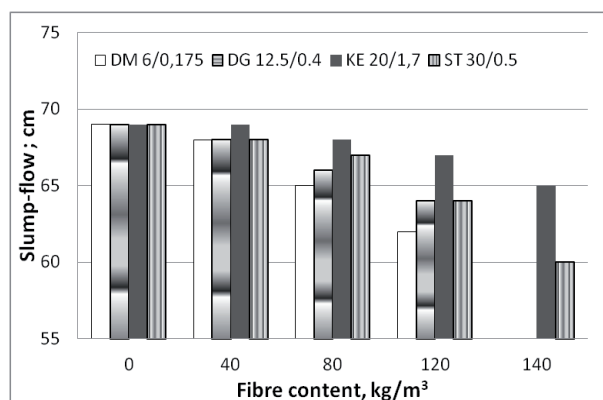
Na rysunku 3 pokazano wpływ rodzaju i udziału objętościowego włókien stalowych na średnicę rozplywu KR i czas rozplywu  $T_{500}$  mieszanek BSZWS. Na podstawie wyników badań można stwierdzić, że wzrost zawartości włókien stalowych w mieszance zmniejsza średnicę KR i zwiększa czas rozplywu  $T_{500}$ . Im krótsze włókna w mieszance, tym większy zakres zmian w BSZWS. Generalnie efekt pogorszenia urabialności BSZWS jest mały w zakresie od 40-80 kg/m<sup>3</sup>. Mieszanka jest łatwa do zastosowania, wykonalna, ale występuje zjawisko nierównomiernego rozkładu włókien w betonie. Efekt ten jest większy, gdy stosunek objętości włókien w BSZ wzrasta i jest największy w przypadku mieszanki zawierającej 140 kg/m<sup>3</sup> włókien stalowych.

Na rysunku 4 przedstawiono wpływ rodzaju i zawartości włókien stalowych na właściwości reologiczne BSZWS mierzone reometrem Viskomat BT2. Stwierdzono wzrost granicy płynięcia  $g$  i lepkości plastycznej  $h$  w BSZWS wraz ze wzrostem zawartości włó-

the experimental results, it can be concluded that an increase in the content of the steel fibres in the mixture reduces the diameter of the SF and increases the time  $T_{500}$ . The shorter the fibres in the mix, the greater the range of changes. Generally, the effect of the SFRSCC mixes workability deterioration with the addition of steel fibres is low in the range of 40-80 kg/m<sup>3</sup> addition. The mixture is easy to apply, workable, but there is a phenomenon of an uneven distribution of fibres in the concrete. This effect is higher when the volume ratio of fibres in the SCC mixture increases and is the highest in the mix containing 100 kg/m<sup>3</sup> of steel fibres.

On Fig. 4 the effect of the type and content of steel fibres on the rheological properties of SFRSCC according to Viskomat BT2 is presented. It has been found the increase of rheological parameters – yield stress value  $g$  and plastic viscosity  $h$  – of self compacting mixtures with increasing fibre content. This effect is the highest for the SCC mixtures with ST 30/0.5 and DM 6/0.17 fibres. In the case of high content of KE 20/1.7 fibres no major changes in the  $g$  and  $h$  of SFRSCC with their addition were found.

Figure 5 shows the effect of the type and volume ratio of steel fibres on the rheological properties of SFRSCC according to Viskomat XL test results. The increase of rheological parameters – yield stress value  $g$  and plastic viscosity  $h$  – of self compacting mixtures with the rise of fibre content in the mixture was found. This effect is the highest for the SCC mixtures with DM 6/0.17 fibres. Increasing



Rys. 3. Wpływ rodzaju i udziału objętościowego włókien stalowych na: a) średnicę rozplywu KR; b) czasu rozplywu  $T_{500}$  mieszanek BSZWS

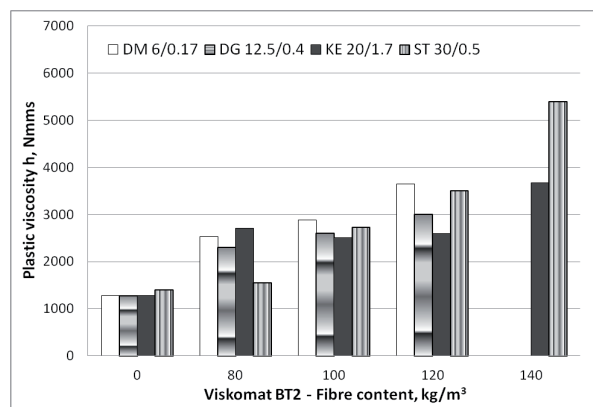
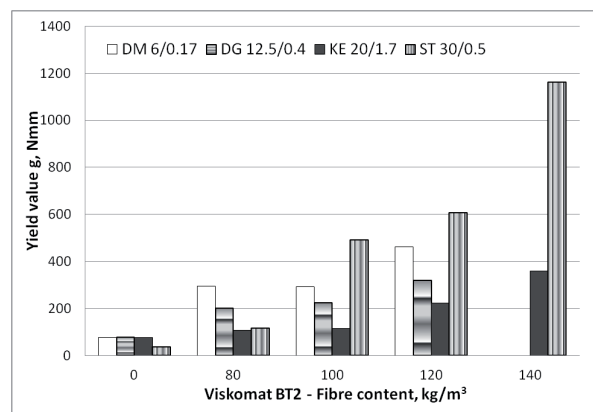
Fig. 3. Effect of steel fibres type and content on Slump-flow of SFRSCC; a) Slump-flow SF; b) flow time  $T_{500}$

kien. Efekt ten jest najwyższy dla BSZWS z włóknami ST 30/0,5 i DM 6/0,17. Nie stwierdzono znacznych zmian wartości  $g$  i  $h$  w przypadku wysokiej zawartości włókien KE 20/1,7.

Na rysunku 5 pokazano wpływ rodzaju i udziału objętościowego włókien stalowych na właściwości reologiczne BSZWS mierzone reometrem Viskomat XL. Stwierdzono wzrost granicy płynięcia  $g$  i lepkości plastycznej  $h$  mieszanek BSZWS wraz ze wzrostem zawartości włókien w mieszance. Efekt ten jest najwyższy dla mieszanek BSZWS, z włóknami DM 6/0,17. Zwiększenie zawartości włókien KE 20/1,7 w BSZ nie wykazało żadnych poważnych zmian lepkości plastycznej  $h$ .

## 5. Wyniki pomiarów wytrzymałości na zginanie i ściskanie

Wyniki pomiarów wytrzymałości na zginanie  $f_{\#}$  BSZWS z różnym rodzajem i zawartością włókien stalowych pokazano na rysunku 6. Krzywe zależności obciążenie - ugięcie uzyskane dla BSZWS z badanym rodzajem włókien, przy zmiennej ich zawartości, są przedstawione na rysunkach 7-10. Rysunek 7 przedstawia krzywą obciążenie-ugięcie i wytrzymałość na ściskanie BSZWS z włóknami DM 6/0,17 przy zawartości 40-80-120 kg/m<sup>3</sup>. Na rysunku 8 przedstawiono krzywą zależności obciążenie-ugięcie i wytrzymałość na ściskanie BSZWS z włóknami DG 12,5/0,4 w przypadku zawartości 40-80-120 kg/m<sup>3</sup>. Rysunek 9 przedstawia krzywą za-



Rys. 4. Wpływ rodzaju i zawartości włókien stalowych na właściwości reologiczne BSZWS; pomiar reometrem BT2 wartości: a) granicy płynięcia  $g$ ; b) lepkości plastycznej  $h$

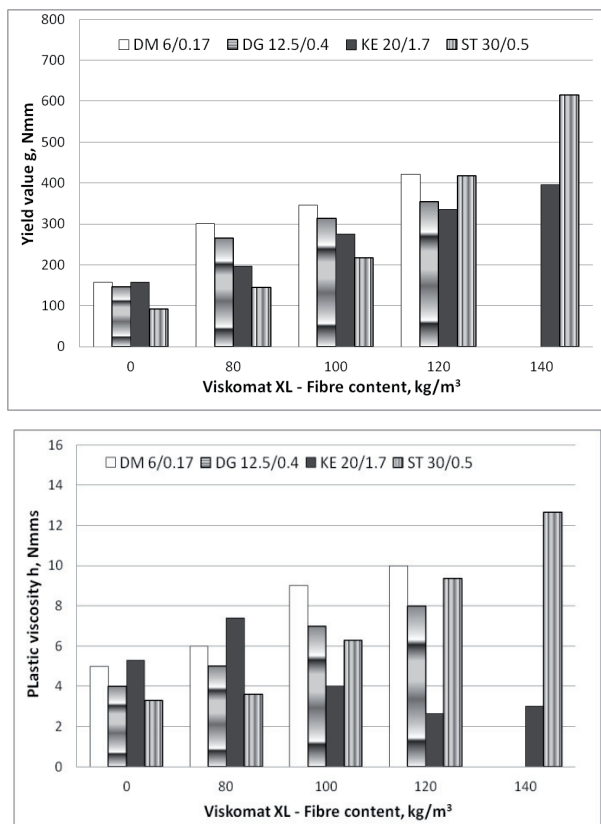
Fig. 4. Effect of steel fibres type and content on rheological properties of SFRSCC measured with Viskomat BT2; a) yield stress value  $g$ ; b) plastic viscosity  $h$

content of KE 20/1.7 fibres showed no major changes of the  $h$  level of SFRSCC.

## 5. The results of flexural and compressive strength measurements

The results of flexural strength  $f_{\#}$  of SFRSCC with different type and content of fibres are shown in Fig. 6. The measured load-deflection curves obtained for SFRSCC with different type and content of fibres are presented in Figs. 7-10. Fig. 7 presents the load-deflection curves and compressive strength of SFRSCC with 40-80-120 kg/m<sup>3</sup> of DM 6/0.17 fibres. On Fig. 8 the load-deflection curves and compressive strength of SFRSCC with 40-80-120 kg/m<sup>3</sup> of DG 12.5/0.4 fibres is shown. Fig. 9 presents the load-deflection curves and compressive strength of SFRSCC with 100-140-160 kg/m<sup>3</sup> of KE 20/1.7 fibres. On Fig. 10 the load-deflection curves and compressive strength of SFRSCC with 40-80-120 kg/m<sup>3</sup> of St 30/0.5 fibres is shown. From the curves shown in Figs. 7-10 it is evident that the highest increase of flexural strength with respect to plain concrete was obtained for SFRSCC with St 30/0.5 fibres.

The effect of the type and content of steel fibres on compressive strength  $f_{cm,28}$  of SCC is shown on Figs. 7-10. The effect of tested fibre on the strength  $f_{cm,28}$  is low and in the case of their high



Rys. 5. Wpływ rodzaju i zawartości włókien stalowych na właściwości reologiczne BSZWS; pomiar reometrem XL wartości: a) granicy płynięcia  $g$ ; b) lepkości plastycznej  $h$

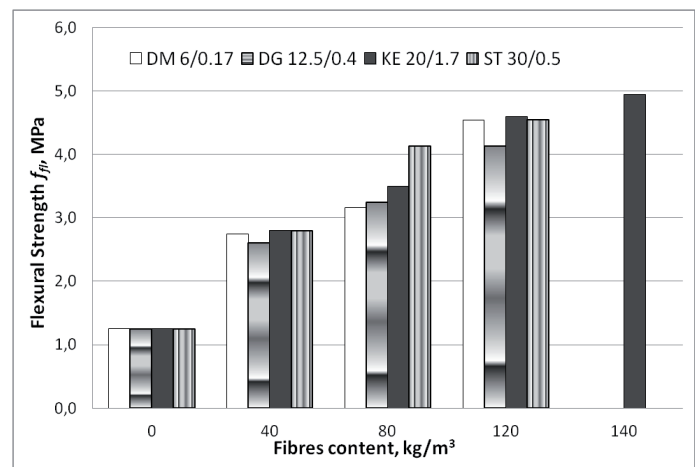
Fig. 5. Influence of steel fibres kind and content on rheological properties of SFRSCC measured with Viskomat XL; a) yield stress value  $g$ ; b) plastic viscosity  $h$

leżności obciążenie-ugięcie i wytrzymałość na ściskanie BSZWS z włóknami KE 20/1,7 i ich zawartości 100-140-160  $\text{kg/m}^3$ . Na rysunku 10 przedstawiono krzywą zależności obciążenie-ugięcie i wytrzymałość na ściskanie BSZWS z włóknami ST 30/0,5 w przypadku zawartości 40-80-120  $\text{kg/m}^3$ . Na podstawie krzywych pokazanych na rysunkach 7-10 stwierdzono największy wzrost wytrzymałości na zginanie w stosunku do zwykłego betonu dla BSZWS z włóknami ST 30/0,5.

Wpływ rodzaju i zawartości włókien stalowych na wytrzymałość na ściskanie  $f_{cm,28}$  BSZWS naniesiono także na rysunkach 7-10. Wpływ badanych włókien na  $f_{cm,28}$  BSZWS z ich dodatkiem jest mały, a w przypadku ich dużej zawartości jest nawet negatywny. W przypadku BSZWS, efekt ten można tłumaczyć nierównomiernym rozmieszczeniem włókien w matrycy betonowej. W przypadku małej zawartości włókien wytrzymałość na ściskanie  $f_{cm,28}$  BSZWS zwiększa się. Wraz ze wzrostem zawartości włókien w BSZWS, efekt nierównomierności rozmieszczenia włókien zwiększa się i powoduje spadek wartości  $f_{cm,28}$  BSZWS.

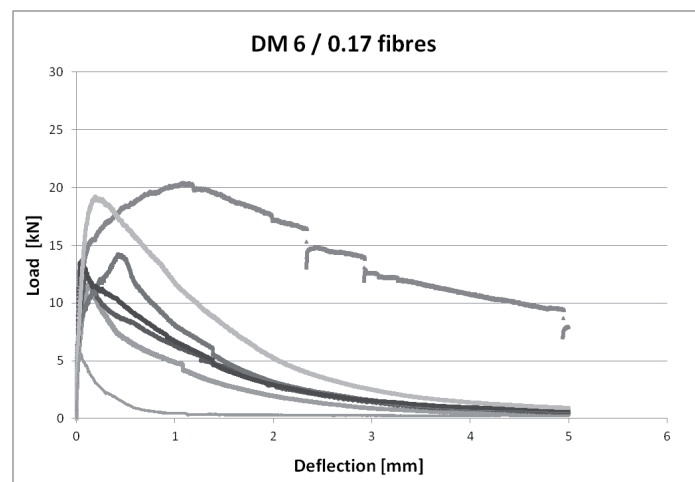
Na rysunku 11 przedstawiono zależność wytrzymałości na zginanie  $f_{fl}$  od wartości granicy płynięcia  $g$  dla badanych BSZWS ze wszystkimi rozpatrywanymi rodzajami włókien stalowych.

Generalnie można stwierdzić, że wzrost granicy płynięcia  $g$  powoduje liniowy wzrost wytrzymałości na zginanie  $f_{fl}$  badanych



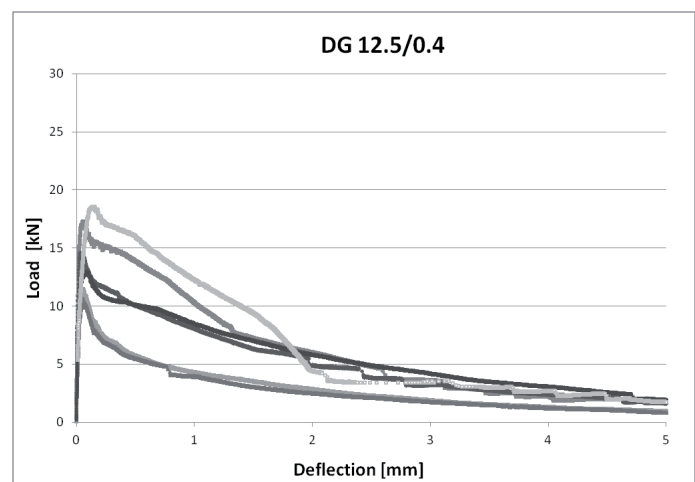
Rys. 6. Wytrzymałość na zginanie  $f_{fl}$  BSZWS z różnymi włóknami i zmienną ich zawartością

Fig. 6. Flexural strength  $f_{fl}$  of SFRSCC with different fibres type and content



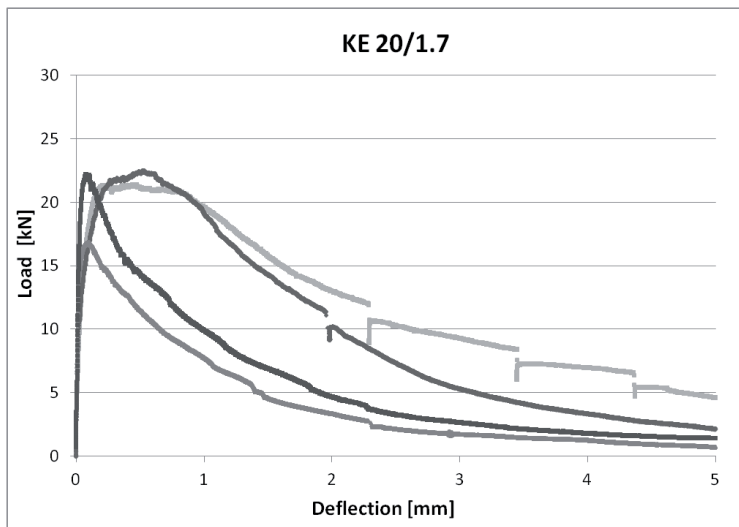
Rys. 7. Krzywe zależności obciążenie-ugięcie BSZWS z włóknami DM 6/0,17 (0-40-80-120  $\text{kg/m}^3$ )

Fig. 7. Load-deflection curves and compressive strength of SFRSCC with DM 6/0.17 fibres (0-40-80-120  $\text{kg/m}^3$ )



Rys. 8. Krzywe zależności obciążenie-ugięcie BSZWS z włóknami DG 12,5/0,4 (40-80-120  $\text{kg/m}^3$ )

Fig. 8. Load-deflection curves and compressive strength of SFRSCC with DG 12.5/0.4 fibres (40-80-120  $\text{kg/m}^3$ )

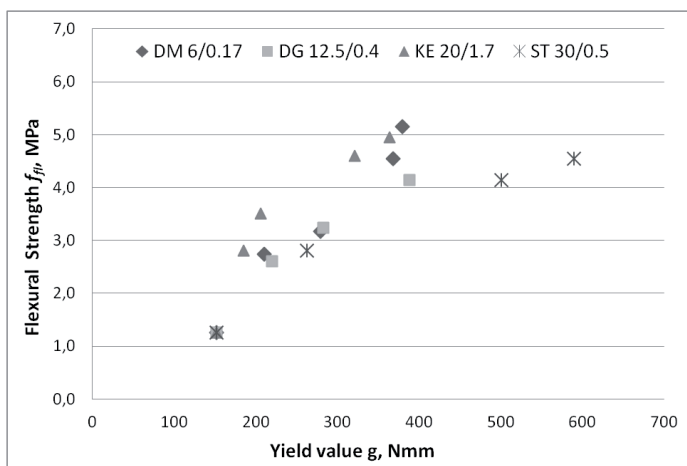


Rys. 9. Krzywe zależności obciążenie-ugięcie BSZWS z włóknami KE 20/1,7 (100-140-160 kg/m<sup>3</sup>)

Fig. 9. Load-deflection curves and compressive strength of SFRSCC with KE 20/1.7 fibres (100-140-160 kg/m<sup>3</sup>)

BSZWS. Możemy wybrać optymalną zawartość włókien i ich rodzaj według zakładanych parametrów reologicznych i mechanicznych.

Na rysunkach 12 i 13 przedstawiono badania metodą tomografii komputerowej i obrazy 2D belek BSZWS z włóknami F 30 x 0,7 mm. Przekroje 2D dla BSZWS z włóknami F 30 x 0,7, przedstawiono w odległości 0-10-20-30-40 cm od miejsca betonowania, co przedstawiono na rysunku 12. Stwierdzono, że wzrost odległości od miejsca betonowania wpływa na orientację włókien i ich nieregularne rozmieszczenie w BSZWS. Na rysunku 13 przedstawiono obrazy 2D belek w przekrojach podłużnych, znajdujących się na wysokości 1-3-7-10-14 cm od dna formy BSZWS z włóknami F 30 x 0,7. Obrazy te potwierdzają tendencje orientacji włókien w matrycy BSZWS. Włókna są zwykle regularnie rozmieszczone w betonie, z wyjątkiem przekrojów na krawędziach próbek betonu.



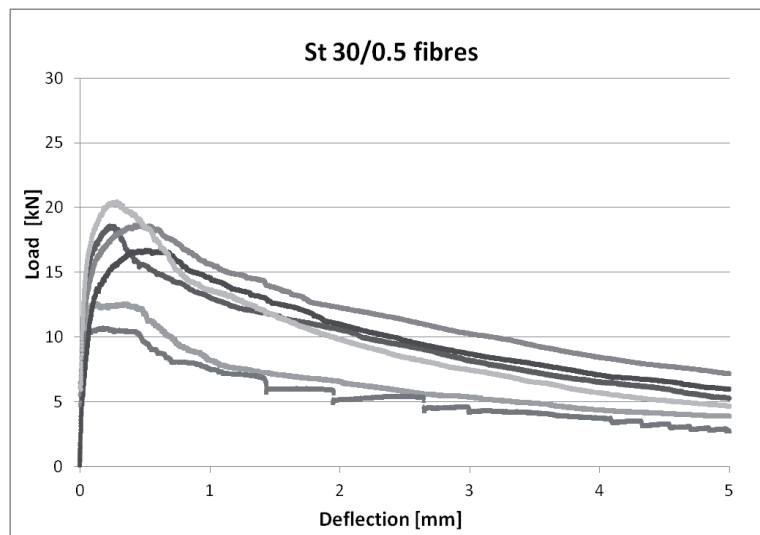
Rys. 11. Zależność wytrzymałości na zginanie  $f_{fl}$  i granicy płynięcia  $g$  dla BSZWS

Fig. 11. Flexural strength  $f_{fl}$  in relation to yield stress value  $g$  for SFRSCC

content is even negative. In the case of SFRSCC, this effect can be explained by the irregular distribution of fibres in the concrete matrix. In the case of low fibre content the compressive strength  $f_{cm,28}$  of the SCC is increased. With higher fibre content the effect of irregular distribution became higher and caused the decrease of  $f_{cm,28}$  of concrete.

In general, the increase of yield stress value  $g$  causes linear rise of flexural strength  $f_{fl}$  of SFRSCC. We can choose the optimal fibres content and type according to the rheological and mechanical demand.

The computed tomography X-ray of 2D sections of SFRSCC beams, with F 30 x 0.7 mm fibres are presented in Figs. 12 and 13. The 2D cross-sections of the concrete with F 30x0.7 fibres, located at 0-10-20-30-40 cm from concrete placing surface are shown in Fig. 12. In general, increasing distance between concrete placing surface influences the fibres orientation and their irregular distribution in SFRSCC. On Fig. 13. X-ray 2D images of SFRSCC beams sections located at 1-3-7-10-14



Rys. 10. Krzywe zależności obciążenie-ugięcie BSZWS z włóknami ST 30/0,5 fibres (40-80-120 kg/m<sup>3</sup>)

Fig. 10. Load-deflection curves and compressive strength of SFRSCC with ST 30/0.5 fibres (40-80-120 kg/m<sup>3</sup>)

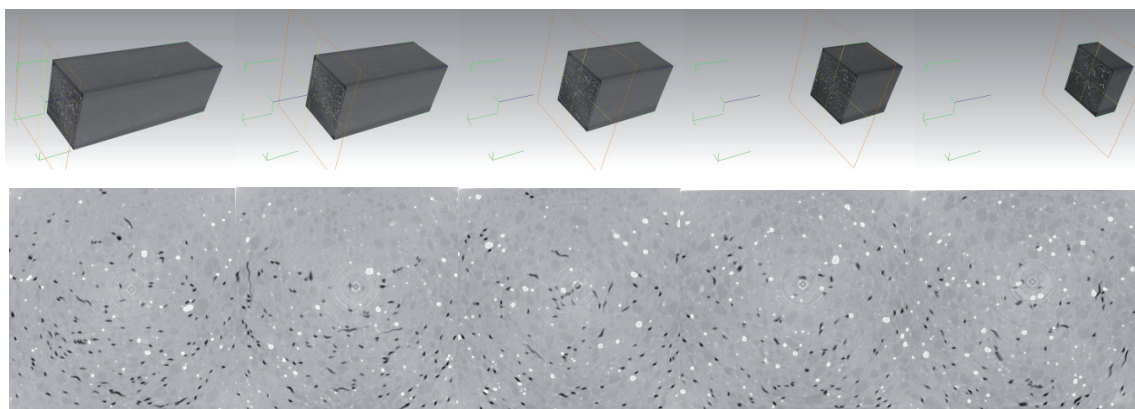
cm from the mould bottom with F 30 x 0.7 fibres.

The 2D image confirms the trend of this orientation of fibres in the concrete matrix. The fibres are generally regularly distributed in concrete, with the exception of selected sections in the edge of the concrete specimens.

## 6. Conclusions

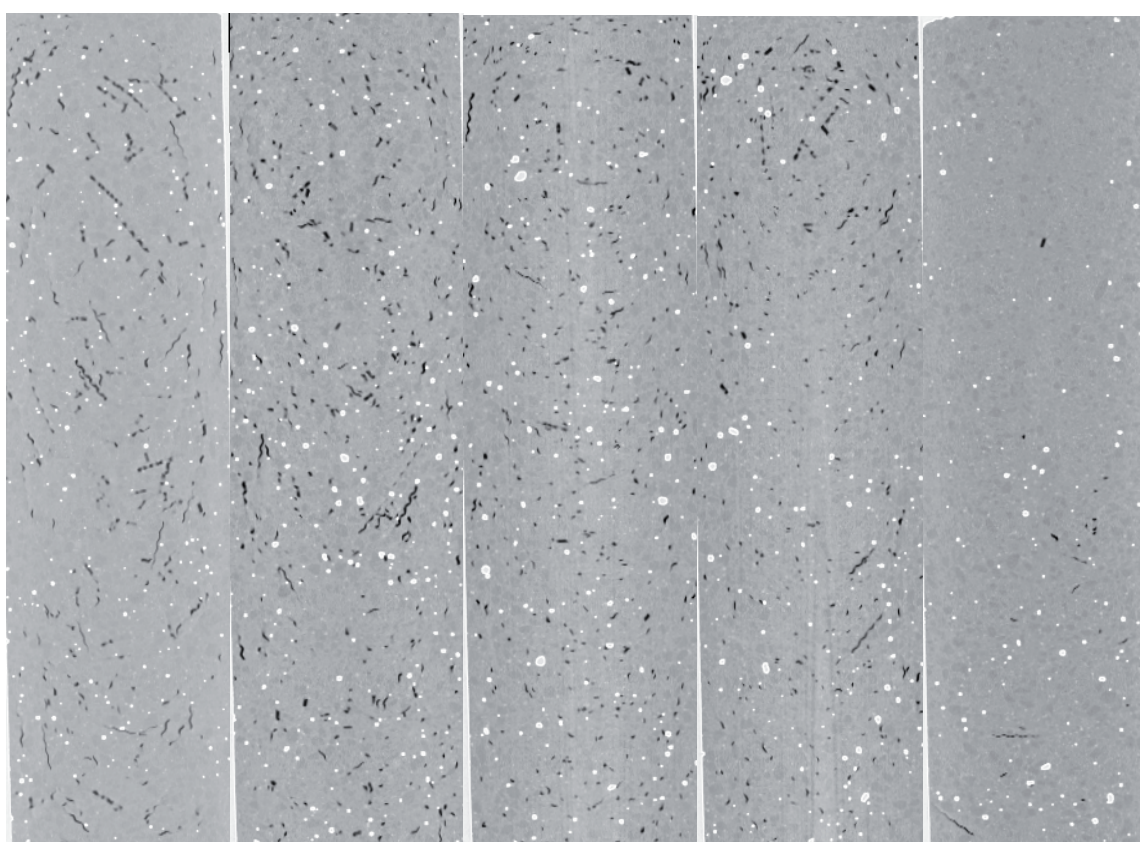
Rheological properties, Slump-flow tests of workability, compressive and flexural strength of SFRSCC were investigated. Basing on experimental results, some conclusions can be drawn:

1. Decline in workability of concrete mixtures occurs, but to a certain extent the properties of self compatibility are maintained.



Rys. 12. Badania metodą tomografii komputerowej i obrazy 2D belek BSZWS z włóknami F 30 x 0,7 mm w odległości 0-10-20-30-40 cm od miejsca betonowania

Fig. 12. X-ray 2D images of SFRSCC beams sections with F 30 x 0.7 fibres; located at 0-10-20-30-40 cm from concrete placing surface



Rys. 13. Obrazy 2D belek w przekrojach podłużnych, znajdujących się na wysokości 1-3-7-10-14 cm od dna formy BSZWS z włóknami F 30 x 0,7

Fig. 13. X-ray 2D images of SFRSCC beams with F 30 x 0.7 fibres in the sections located at 1-3-7-10-14 cm from the bottom of the mould

## 6. Podsumowanie

Wykonano badania właściwości reologicznych oraz urabialności metodą rozplywu, a także badania wytrzymałości na ściskanie i zginanie betonów BSZWS. Na podstawie wyników badań eksperymentalnych, można stwierdzić, że:

1. Występuje pogorszenie urabialności mieszanek betonowych BSZWS, ale w stopniu zapewniającym właściwości samozagęszczalności mieszanek.
2. Samozagęszczalność mieszanek betonowych BSZWS pogarsza się w przypadku zastosowania 1,5% dodatku włókien. Po-
2. The self compatibility of concrete mixtures deteriorates with the case of 1.5% content of fibres in the mixture. Despite the deterioration of workability, the self compatibility of the mixtures with the addition of steel fibres is maintained and the mechanical properties of concrete are satisfactory. The threshold value of fibres is 2%.
3. The orientation of fibres connected with the direction of the SFRSCC mix flow during moulding was confirmed. The uniform distribution of fibres in the produced concrete elements was confirmed as well. There was no evidence of fibres clusters formation.



mimo pogorszenia urabialności, samozagęszczalność mieszanki BSZWS jest zachowana, a właściwości mechaniczne betonu są zadowalające. Wartość progowa dla badanych włókien wynosi 2%.

3. Badania potwierdziły orientację włókien związaną z kierunkiem przepływu mieszanki BSZWS, podczas formowania. Potwierdzono również kierunkowy rozkład włókien w wykonanych elementach betonowych. Nie stwierdzono miejsc nadmiernej koncentracji włókien.

Ważnym problemem pozostaje jednak konieczność określenia wpływu metody formowania, rodzaju i ilości włókien stalowych oraz właściwości reologicznych mieszanki na rozmieszczenie i ukierunkowanie włókien oraz właściwości mechaniczne BSZWS. Będzie to głównym celem przyszłych badań.

However, the important problem remains: it is necessary to determine how in various structures the deployment of the dispersed reinforcement is dependent on the placement of the concrete mixture, taking into account its rheological and mechanical properties, the content and geometric parameters of the steel fibres in SFRSCC. It is the main goal of future studies.

## Literatura / References

1. B. Barragán, R. Zerbino, R. Gettu, M. Soriano, C. De la Cruz, G. Giaccio, M. Bravo, Development and application of steel fibre reinforced self-compacting concrete, 6<sup>th</sup> RILEM Symposium on Fibre Reinforced Concrete FRC – BEFIB, p. 457, Varenna, Italy 2004.
2. Y. Ding, D. Thomaseth, Ch. Niederegger, A. Thomas, W. Lukas, The investigation on the workability and flexural toughness of fibre cocktail reinforced self-compacting high performance concrete, BEFIB, p. 467, Varenna, Italy 2004.
3. M. Kaszyńska, Mix design of the self-compacting concrete, Proc. Int. Symp. `BMC7`, A. M. Brandt, V. C. Li, I. H. Marshall, p. 331, Warsaw 2003.
4. R. Zerbino, J. M. Tobes, M. E. Bossio, G. Giaccio, On the orientation of fibres in structural members fabricated with self compacting fibre reinforced concrete, *Cem. Concr. Comp.* **34**, 191 (2012).
5. D. J. Kim, A. E. Naaman, S. El-Tawil, Comparative flexural behavior of four fiber reinforced cementitious composites. *Cem. Concr. Comp.* **30**, 917 (2008).
6. Y. Ding, C. Azevedo, J. B. Aguiar, S. Jalali, Study on residual behavior and flexural toughness of fibre cocktail reinforced self compacting high performance concrete after exposure to high temperature, *Constr. Build. Mat.* **26**, 21 (2012).
7. Y. Ding, S. Liu, Y. Zhang, A. Thomas, The investigation on the workability of fibre cocktail reinforced self-compacting high performance concrete, *Constr. Build. Mat.* **22**, 1462 (2008).
8. S.-T. Kang, J.-K. Kim, Investigation on the flexural behavior of UHPCC considering the effect of fiber orientation distribution, *Constr. Build. Mat.* **28**, 57 (2011).
9. T. Ponikiewski, G. Cygan, Some properties of self-compacting concretes reinforced with steel fibres, *Cement Wapno Beton*, **78**, 203 (2011).
10. S.-T. Kang, J.-K. Kim, The relation between fiber orientation and tensile behavior in an Ultra High Performance Fiber Reinforced Cementitious Composites (UHPFRCC), *Cem. Concr. Resear.* **41**, 1001 (2011).
11. P. N. D. Tanikella, R. Gettu, On the distribution of fibers in self compacting concrete. 7<sup>th</sup> RILEM Symposium on Fibre - Reinforced Concretes - BEFIB, RILEM Publications S.A.R.L Chennai, India., p. 1147 (2008).
12. M. C. Torrijos, J. M. Tobes, B. E. Barragán, R. L. Zerbino, Orientation and distribution of steel fibres in self-compacting concrete. *ibid.* p. 729 (2008).
13. L. Vandewalle, G. Heirman, F. van Rickstal, Fibre orientation in self-compacting fibre reinforced concrete *ibid.*, p. 719 (2008).
14. M. Y. Yardimci, B. Baradan, M. A. Taşdemir, Studies on the relation between fiber orientation and flexural performance of SFRSCC, *ibid.*, p. 711 (2008).
15. S. Grünewald, J. C. Walraven, High strength self-compacting fibre reinforced concrete: behaviour in fresh and hardened state, 6<sup>th</sup> Inter. Symp. on High Strength/High Perf. Con., Leipzig, p. 453 (2002).
16. T. Ponikiewski, The rheological properties of fresh steel fibre reinforced self-compacting concrete, in: Proc. Int. Symp. `Brittle Matrix Composites 8`, A. M. Brandt, V. C. Li, I. H. Marshall, p. 451, Warsaw 2006.
17. T. Ponikiewski, J. Gołaszewski, The new approach to the study of random distribution of fibres in high performance self-compacting concrete, *Cement Wapno Beton*, **79**, 165 (2012).
18. G. H. Tattersall, P. F. G. Banfill, *The Rheology of Fresh Concrete*. Pitman Books Limited, Boston 1983.
19. RILEM TC162-TDF: Test and design methods for steel fibre reinforced concrete, Recommendations: Bending test, *Mat. Struc.*, **33**, 145 (2000).