

prof. dr hab. inż. Janusz Szwabowski, dr inż. Tomasz Ponikiewski

Katedra Procesów Budowlanych, Wydział Budownictwa, Politechnika Śląska w Gliwicach

Wpływ geometrii włókien stalowych na wybrane charakterystyki fibrobetonów samozagęszczalnych

Influence of steel fibres geometry on chosen profiles of self-compacting concrete

1. Wprowadzenie

W artykule omówiono aktualne problemy technologiczne w zastosowaniu do betonu samozagęszczalnego z dodatkiem włókien stalowych jako zbrojeniem rozproszonym. Analiza wykluczających się nawzajem czynników zachodzących w wyniku dodania włókien stalowych do betonu samozagęszczalnego: pogarszania się urabialności czy nawet utraty cech samozagęszczalności, a poprawy właściwości mechanicznych tych betonów jest przedmiotem niniejszego artykułu.

Zaprezentowano badania wpływu włókien stalowych o różnicowanych parametrach geometrycznych, celem określenia wpływu ich udziału objętościowego, długości oraz kształtu na właściwości reologiczne i mechaniczne betonów samozagęszczalnych. Analizowanie wpływu włókien na urabialność oraz parametry wytrzymałościowe betonów jest jedną z nowych tendencji w badaniach betonów samozagęszczalnych (1, 2, 4). Istota stosowania w mieszankach na spoiwach cementowych włókien stalowych była już omawiana we wcześniejszych publikacjach (3, 6). Ogólna tendencja poprawy właściwości stwardniałego betonu samozagęszczalnego wraz ze wzrostem zawartości włókien w jego objętości, powoduje pogarszanie urabialności tychże mieszanek w trakcie ich formowania. Aktualnym problemem, także w przypadku betonów samozagęszczalnych modyfikowanych włóknami stalowymi, jest technologiczna trudność ich wykonywania oraz realizacji procesów technologicznych w trakcie robót betonowych. Zmusza to do rozpoznania rzeczywistej natury ich urabialności i określenia wpływu dodawania włókien na zjawiska zachodzące w świeżym i stwardniałym betonie samozagęszczalnym.

1. Introduction

The current technological problems in applying the self-compacting concrete modified with steel fibres as dispersed reinforcement are discussed in the article. The analysis of mutually excluding factors occurring as a result of addition steel fibres to the self-compacting concrete: deteriorating of workability or even loss of the self-compacting and improvement of mechanical properties of the self-compacting concrete is the subject of the present article.

The research concerning the influence of steel fibres of various geometric parameters were presented to determine the impact of its volume fraction, the length and the shape on rheological and mechanical properties of self-compacting concrete.

Analysis of the fibres influence on workability and durability of the properties of concrete is one of new tendencies in investigations of self-compacting concrete (1, 2, 4). The essence of applying steel fibres in mixes on cement binders was already discussed in previous publications (3, 6). The general tendency of the improvement of hardened self-compacting concrete characteristics with increase of contents of fibres in its volume, worsen workability of these concrete mixes during their casting. The current problem, also in case of self-compacting concrete modified with the steel fibres, is a technological difficulty of its production as well as carrying out of technological processes in concrete works. It compels to recognize the real nature of their workability and define the impact of added fibres on phenomena taking place in fresh and hardened self-compacting concrete.

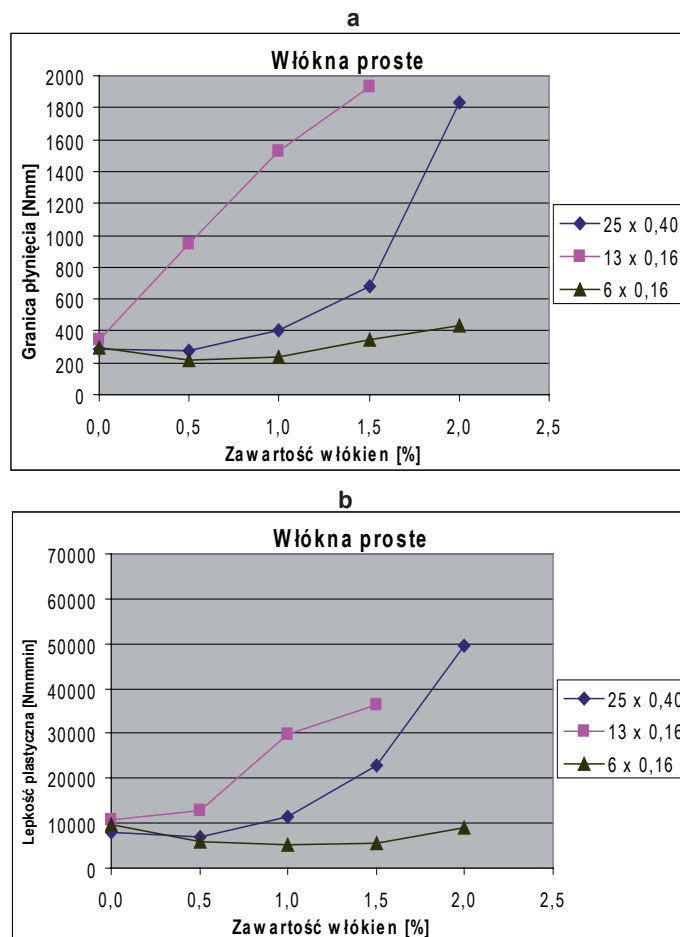
2. Założenia i metody badań

W referacie zostały przedstawione wyniki badań urabialności w ujęciu reologicznym mieszanek samozagęszczalnych modyfikowanych włóknami stalowymi. Badania metodą reometrycznego testu urabialności (RTU) zostały przeprowadzone za pomocą reometru do zapraw i mieszanek betonowych – BT-2. Zasada RTU została omówiona szczegółowo w literaturze (5). Wykonano aproksymację wyników pomiarów dwuparametrowym modelem reologicznym Bingham, co pozwoliło na określenie dwóch podstawowych parametrów reologicznych – granicy płynięcia g oraz lepkości plastycznej h . Mieszanka betonowa ulega modyfikacji ze względu na zmienny w badaniach rodzaj i dział objętościowy włókien stalowych. W artykule prezentowane są wyniki badań mieszanek samozagęszczalnych z dodatkiem jedenastu rodzajów włókien stalowych. Badania przeprowadzono w dwóch blokach dla czterech poziomów zmienności. W pierwszym bloku prowadzono badania dla zmiennego udziału objętościowego włókien w matrycy. W drugim bloku rozpatrywano zmienny stopień zbrojenia włóknistego (czynnika włóknistego) (F_F), uwzględniający geometrię włókien (długość L i średnicę d) oraz udział objętościowy włókien V_f w mieszance. Uwzględnienie w badaniach stopnia zbrojenia włóknistego (F_F) pozwala w sposób bardziej miarodajny określić wpływ poszczególnych parametrów charakteryzujących stosowane zbrojenie rozproszone na urabialność rozpatrywanych mieszanek samozagęszczalnych w ujęciu reologicznym. W bloku I badań, udział objętościowy badanych w mieszance betonowej włókien wynosił 0,5–1,0–1,5–2,0%, co odpowiada zawartości 39,25–78,50–117,75–157,00 kg/m³. W bloku II badań rozpatrywano poziom zmienności (F_F) o wartościach 0,2–0,4–0,6–0,8, co odpowiada masie włókien uzależnionej od ich smukłości. Kształt włókien ze względu na zmienność ich geometrii jest dodatkowym czynnikiem, wpływającym na wyniki badań lecz nakładającym się na rozpatrywane pozostałe parametry zmienne włókien.

3. Wyniki badań i ich omówienie

Właściwości samozagęszczalne mieszanek z dodatkiem włókien stalowych badano ustalając parametry reologiczne wyznaczone metodą RTU. Na podstawie badań wstępnych, określających zależność pomiędzy czasem i średnicą rozplywu wyznaczonymi metodą rozplywu stożka Abramsa, ustalono przybliżoną granicę samozagęszczalności dla badanych mieszanek z dodatkiem włókien stalowych, wg założenia: czas rozplywu $T_{50} = \max 9$ sekund oraz średnica rozplywu $R = \min 600$ mm. Powyższe założenia granicy samozagęszczalności uzyskiwano dla maksymalnej granicy płynięcia g na poziomie 600 Nmm. Nie wykazano jednoznacznej wartości lepkości plastycznej h jako granicznej w zakresie samozagęszczalności mieszanek z dodatkiem włókien stalowych. Na rysunkach 1 i 2 przedstawiono wpływ rodzaju i udziału objętościowego włókien stalowych prostych na parametry reologiczne mieszanek samozagęszczalnych - granicę płynięcia g oraz lepkość plastyczną h .

Wykazano wzrost granicy płynięcia g oraz lepkości plastycznej h wraz ze wzrostem udziału objętościowego włókien prostych w rozpatrywanym obszarze badawczym mieszanek samozagęsz-



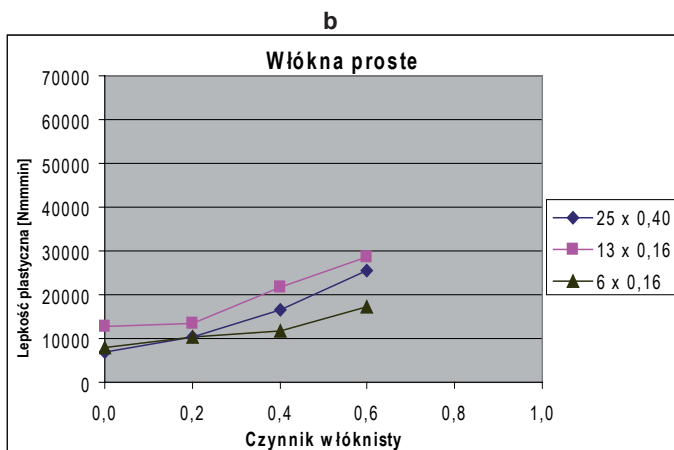
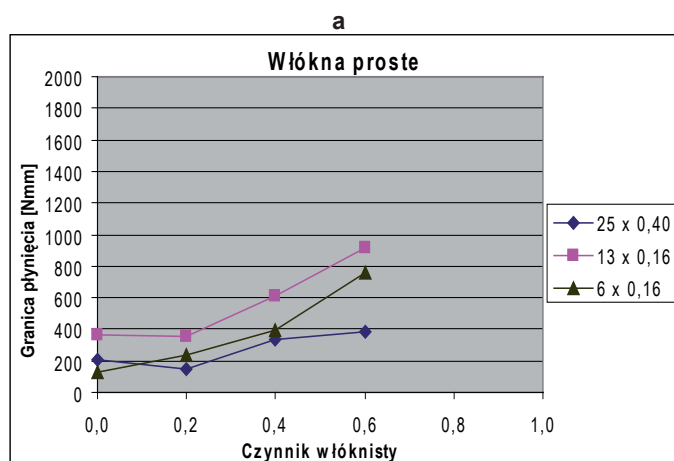
Rys. 1. Wpływ rodzaju i udziału objętościowego włókien stalowych prostych na: a) wartość granicy płynięcia g , b) wartość lepkości plastycznej h

Fig. 1. Influence of kind and volume fraction of straight steel fibres on: a) yield value g , b) plastic viscosity h value

2. Assumptions and methods of research

Results of workability tests of self-compacting cement mixes modified with steel fibres in rheological context are presented in this article. Research carried out with the rheometrical workability test (RWT) was conducted with a Rheometer for mortars and concrete mixes – BT-2. The principle of RWT was discussed in detail in the literature (5). The approximation of measurement results was done by two-parameter Bingham rheological model. It allowed to determine two basic rheological parameters- yield value g and plastic viscosity h . Concrete mixture was modified with the changes in investigations kind and volume fraction of steel fibres. The research results of self-compacting mixtures modified with eleven types steel fibres are presented in the paper. The investigations were conducted in two steps for four levels of variability.

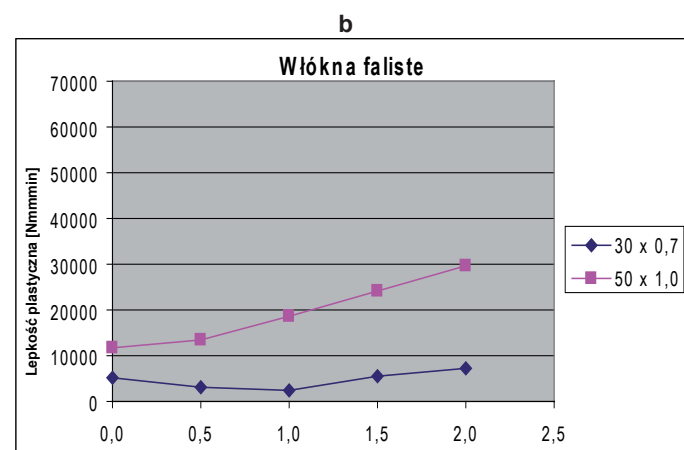
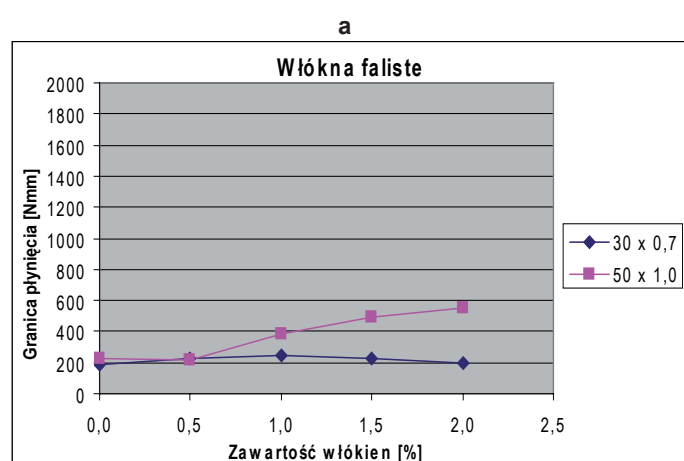
In the first step tests were carried out for the variable volume fraction of fibers in the matrix. In the second step a variable level of the fibre reinforcement was examined for the fibre factor (F_F) taking geometric parameters of fibres into consideration (length L_f and diameter d_f) as well as fibre volume fraction (V_f) in the mixture. Taking the level of the fibre reinforcement (F_F) into consideration allows to determine the influence of each parameter that characterize the use of diffused reinforcement on workability of self-compacting mixtures in rheological context in more reliable way.



Rys. 2. Wpływ rodzaju i czynnika włóknistego włókien stalowych prostych na: a) wartość granicy płynięcia **g**, b) wartość lepkości plastycznej **h**

Fig. 2. Influence of kind and fibre factor of straight steel fibres on: a) yield value **g**, b) plastic viscosity **h** value

czalnych ich dodatkiem. W tej grupie badawczej (włókna proste), dodatek włókien 13x0,16 do mieszanki powodował największy wzrost parametru **g** a co za tym idzie, największe pogorszenie się urabialności. Natomiast dodatek włókien 6x0,16 do mieszanki powodował najmniejszy wzrost parametru **g**, czyli uzyskano najmniejsze pogorszenie się urabialności rozpatrywanej mieszanki. W przypadku lepkości plastycznej **h**, największa wartość tego parametru została uzyskana również dla mieszanki samozagęszczalnej z dodatkiem włókien 13x0,16 co także wpływa na pogorszenie się urabialności rozpatrywanej mieszanki. Dodatek włókien 6x0,16 do mieszanki powodował najmniejszy wzrost parametru **h**, czyli uzyskano najmniejsze pogorszenie się urabialności rozpatrywanej mieszanki. Podobne tendencje w wynikach badań mieszanek samozagęszczalnych z dodatkiem włókien prostych uzyskano w I i II bloku badań. Warunki samozagęszczalności najszybciej przestały spełniać mieszanki z dodatkiem włókien 13x0,16. Wpływ rodzaju i udziału objętościowego włókien stalowych falistych na granicę płynięcia **g** oraz lepkość plastyczną **h** przedstawiono na rysunkach 3 i 4. Wykazano również wzrost wartości granicy płynięcia **g** oraz wartości lepkości plastycznej **h** wraz ze wzrostem udziału objętościowego włókien falistych w mieszance samozagęszczalnej. W tej grupie badawczej (włókna faliste), dodatek włókien 50x1,0 do mieszanki powodował największy wzrost parametru **g** w obu rozpatrywanych blokach badań, czyli największe pogorszenie się urabialności rozpatrywanych mieszanek samozagęszczalnych z ich dodatkiem.



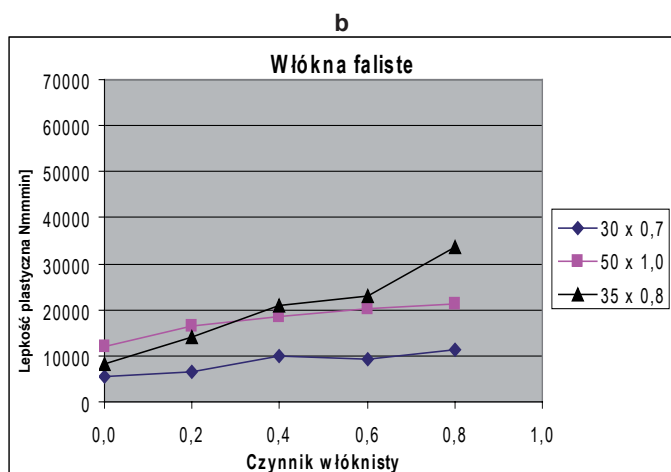
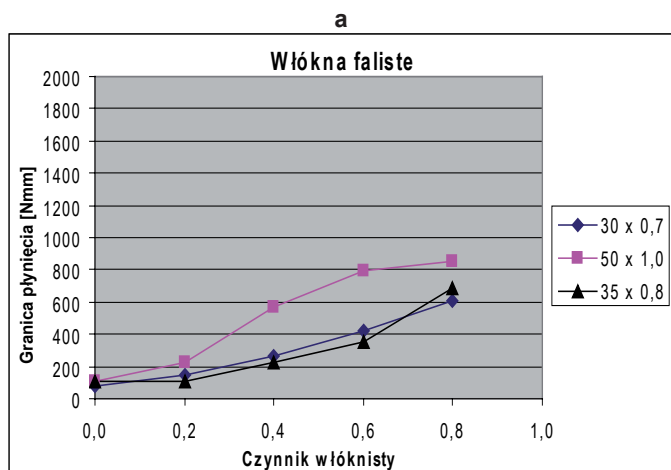
Rys. 3. Wpływ rodzaju i udziału objętościowego włókien stalowych falistych na: a) wartość granicy płynięcia **g**, b) wartość lepkości plastycznej **h**

Fig. 3. Influence of kind and volume fraction of wavy steel fibres on: a) yield value **g**, b) plastic viscosity **h** value

In the first step, tested volume fraction (V_f) in the concrete mixture was 0.5-1.0-1.5-2.0% which corresponds to the 39.25-78.50-117.75-157.00 kg/m³ contents. In the second step, the levels of variability (F_f) was considered 0.2-0.4-0.6-0.8, which corresponds to fibre mass that is subject to slenderness of fibres. The shape of fibres due to the variability of their geometry is an additional factor influencing test results, but overlapping with considered remaining variable parameters of fibres.

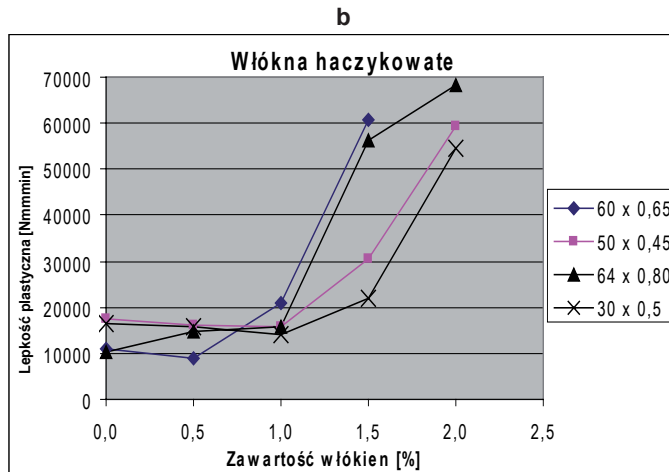
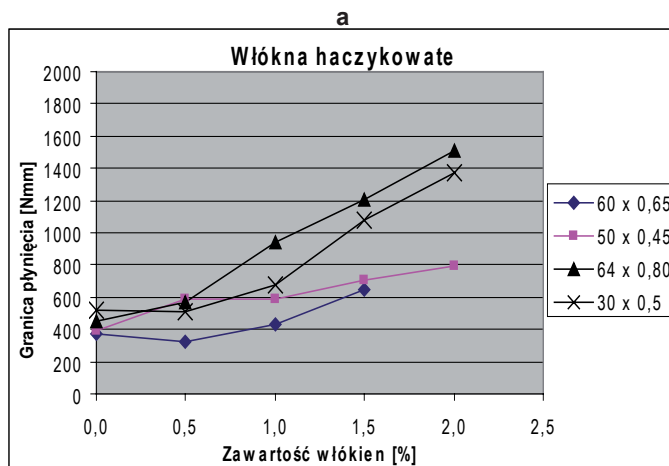
3. Results of tests and discussion

Properties of self-compacting mixtures modified with steel fibres were tested to determine rheological parameters measured with RTU method. On the basis of pre-examinations, determining relations between the time and the flow diameter measured with Abram's cone method, an estimated self-compacting limit was determined for tested mixtures with steel fibres, according to the assumption: flow time $T_{50} = \max 9$ seconds and the flow diameter $R = \min. 600$ mm. The above mentioned assumptions of the self-compacting limit were obtained for maximal yield value **g** on the level 600 Nmm. Any plastic viscosity level (**h**) as a limit for self-compacting mixtures with steel fibres was unambiguously determined. Figures 1 and 2 present the influence of type and volume fraction of straight steel fibres on rheological parameters of self-compacting mixtures - yield value **g** and plastic viscosity **h** value.



Rys. 4. Wpływ rodzaju i czynnika włóknistego włókien stalowych faliste na: a) wartość granicy płynięcia **g**, b) wartość lepkości plastycznej **h**

Fig. 4. Influence of kind and fibre factor of wavy steel fibres on: a) yield value **g**, b) plastic viscosity **h** value



Rys. 5. Wpływ rodzaju i udziału objętościowego włókien stalowych haczykowatych na: a) wartość granicy płynięcia **g**, b) wartość lepkości plastycznej **h**

Fig. 5. Influence of kind and volume fraction of hooked steel fibres on: a) yield value **g**, b) plastic viscosity **h** value

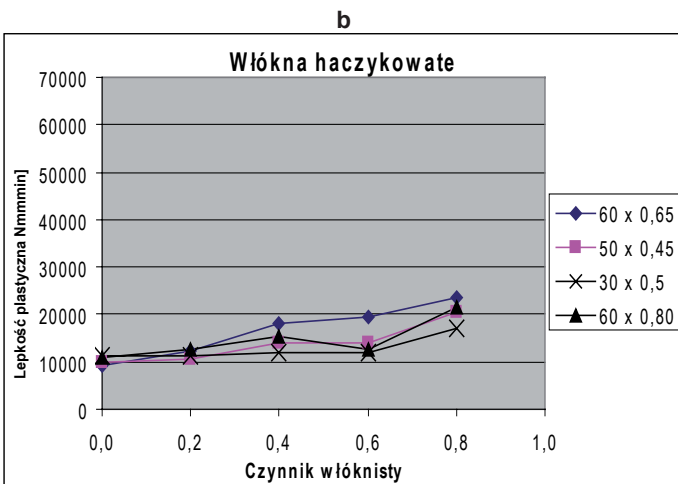
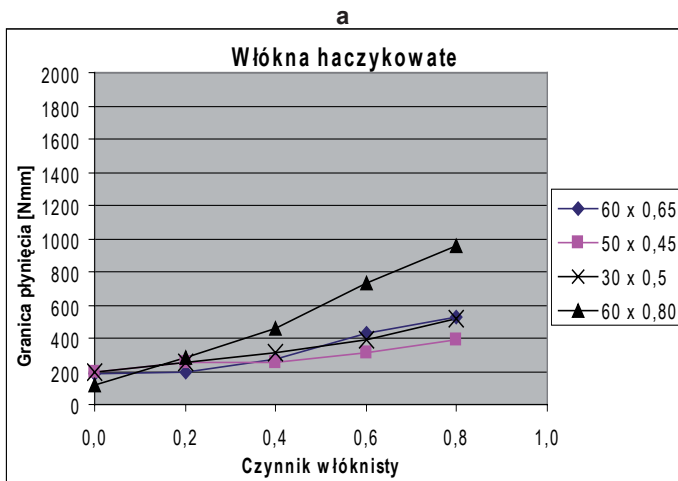
Warunek samozagęszczalności uzyskano dla wszystkich rozpatrywanych włókien falistych w całym zakresie zmienności udziału objętościowego. W przypadku czynnika (F_F), granicą samozagęszczalności dla wszystkich włókien falistych był poziom 0,6.

Włókna stalowe haczykowate były kolejnymi rozpatrywanymi włóknami i wpływ ich dodatku na parametry reologiczne mieszanek samozagęszczalnych przedstawiono na rysunkach 5 i 6. Wykazano również wzrost wartości granicy płynięcia **g** oraz lepkości plastycznej **h** wraz ze wzrostem udziału objętościowego włókien w mieszance samozagęszczalnej.

W tej grupie badawczej, dodatek włókien 64x0,80 powodował najszybszy przyrost wartości **g** i **h** oraz graniczne spełnianie warunku samozagęszczalności dla udziału objętościowego 0,5. Zbliżone parametry uzyskano dla włókien 30x0,5. Najmniejszy wzrost granicy płynięcia **g** uzyskano dla mieszanek z dodatkiem włókien 60x0,65, warunek samozagęszczalności uzyskano dla udziału objętościowego w granicach 1,0%. Wszystkie badane włókna haczykowate, za wyjątkiem omawianych wyżej włókien 64x0,80, spełniały warunek samozagęszczalności w całym rozpatrywanym przedziale stopnia zbrojenia włóknistego. Wykazano brak samozagęszczalności mieszanek w całym rozpatrywanym w bloku I przedziale dodawania włókien prostych 13x0,16. Całkowity – rozpatrywany w badaniach bloku I – prze-

The increase of yield value **g** and plastic viscosity **h** value with the increase of straight fibres volume fraction in the considered research area of modified self-compacting mixtures was shown. In this research group (straight fibres), addition of 13x0.16 fibres to the mixture resulted in the biggest increase of **g** parameter and, what follows, the biggest deterioration of workability. Addition of 6x0.16 fibers to the mixture resulted in lowest increase of **g** parameter and, what follows, the smallest deterioration of workability of examined mixture. The biggest value of plastic viscosity was obtained also for self-compacting mixture with addition of 13x0.16 what worsen workability tested mixture either. Addition of 6x0.16 fibers to the mixture resulted in lowest increase of **h** parameter and, what follows the smallest deterioration of plastic viscosity of the mixture. Similar tendencies in the tests results of self-compacting mixtures with addition of straight fibres were acquired in the first and second step of investigations. Mixtures with addition of 13x0.16 fibres the most quickly worsen to fulfil conditions of self-compacting. Figures 3 and 4 present the influence of type and volume fraction of wavy steel fibres on yield value **g** and plastic viscosity **h** value.

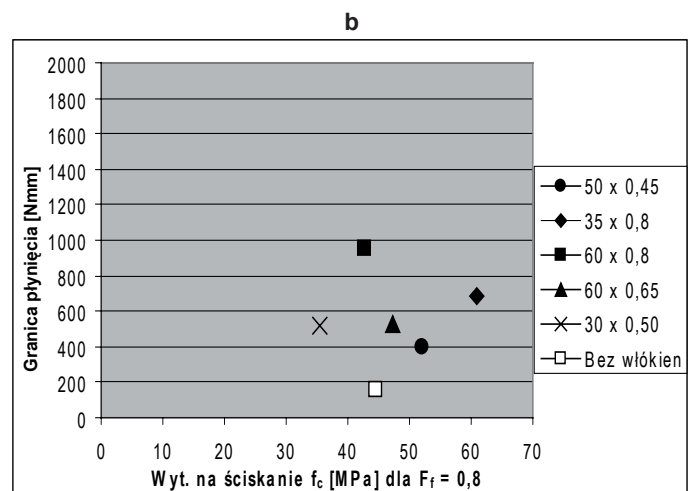
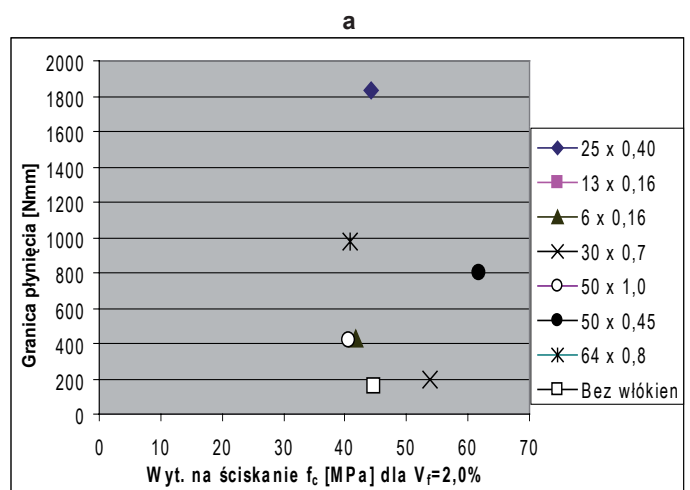
The increase of yield value **g** and plastic viscosity **h** value along with the increase of wavy fibres volume fraction in self-compacting mixtures was shown. In this research group (wavy fibres), addition of 50x1.0 fibres to the mixture resulted in the highest increase of **g**



Rys. 6. Wpływ rodzaju i czynnika włóknistego włókien stalowych haczykowatych na: a) wartość granicy płynięcia g , b) wartość lepkości plastycznej h
 Fig. 6. Influence of kind and fibre factor of hooked steel fibres on: a) yield value g , b) plastic viscosity h value

dział zachowania samozagęszczalności mieszanek modyfikowanych włóknami stalowymi stwierdzono dla dwóch typów włókien falistych 30x0,7 – 50x1,0 oraz dla włókien prostych 6x0,16. Dla dwóch rodzajów włókien nie przeprowadzono badań. Całkowity – rozpatrywany w badaniach bloku II – przedział zachowania samozagęszczalności mieszanek modyfikowanych włóknami stalowymi ze względu na zmienny stopień zbrojenia włóknistego stwierdzono dla włókien prostych 25x0,40 oraz dla włókien haczykowatych 50x0,45, 60x0,65 oraz 30x0,50. Nie wykazano jednoznacznego wpływu długości włókien na zmiany parametrów reologicznych rozpatrywanych mieszanek z ich dodatkiem.

Na podstawie rysunku 7 można ocenić wpływ rodzaju włókien stalowych na wartość granicy płynięcia g mieszanek samozagęszczalnych i wytrzymałość na ściskanie f_c , dla udziału objętościowego 2%, oraz dla czynnika włóknistego 0,8. Dodatek do mieszanki samozagęszczalnej włókien stalowych wykazuje wzrost wartości granicy płynięcia g dla wszystkich rozpatrywanych rodzajów włókien, ale wytrzymałość na ściskanie zwiększyła się jedynie w przypadku dodania dwóch rodzajów włókien 50x0,45 oraz 30x0,7. Włókna 25x0,40 dla $V_f = 2,0\%$ charakteryzowały się największym przyrostem granicy płynięcia g przy niezmienniej wartości f_c . Potwierdza to konieczność przeprowadzenia szerszych i bardziej miarodajnych badań w zakresie wpływu dodatku włókien



Rys. 7. Wpływ rodzaju włókien stalowych na wartość granicy płynięcia g i wytrzymałość na ściskanie f_c , a) dla udziału objętościowego 2%, b) dla czynnika włóknistego 0,8

Fig. 7. Influence of kind of steel fibres on yield value g and compressive strength f_c , a) for volume fraction 2%, b) for fibre factor 0,8

parameter in both research blocks and, what follows, the biggest deterioration of workability of modified self-compacting mixtures.

Conditions of self-compacting was obtained for all considered wavy fibres in the whole range of variability of volume fraction. In case of the factor (F_F), self-compacting limit for all wavy fibres was level 0.6.

Steel hooked fibres were next considered fibres. The influence of their addition on the rheological parameters of self-compacting mixtures presents Figures 5 and 6. The increase of yield value g and plastic viscosity h along with the increase of fibre volume fraction in self-compacting mixture was also shown. In this research group, addition of 64x0.80 fibres resulted in the fastest increase of g and h value and self-compacting limit for volume fraction 0.5. Approximate parameters were obtained for 30x0.5 fibres. The smallest increase of yield value g was acquired for mixtures with addition of 60x0.65 fibres, self-compactness condition was fulfilled for volume fraction 1.0%.

All examined hooked fibres except 64x0,80 fibres, fulfilled self-compacting condition in the whole considered range of degree of fibres reinforcement. The lack of self-compacting of mixtures in the

stalowych na samozagęszczalność oraz właściwości mechaniczne betonów. Należy dodać, że włókna faliste 30x0,7 dawały najmniejszy przyrost wartości granicy płynięcia g czyli najmniejszym pogorszeniem urabialności przy jednoznacznym wzroście wytrzymałości na ściskanie.

4. Wnioski

Na podstawie przeprowadzonych badań, można przedstawić przybliżone przedziały zachowania samozagęszczalności mieszanek z dodatkiem włókien stalowych o zróżnicowanej geometrii udziale objętościowym w mieszance betonowej. Z punktu widzenia zachowania samozagęszczalności mieszanek z dodatkiem włókien stalowych, udział objętościowy 2,0% włókien w matrycy wydaje się być zalecanym i zapewniającym ich zachowanie ale nie w przypadku dodawania wszystkich rozpatrywanych włókien. Występują problemy z zachowaniem jednorodnego wypełnienia przestrzeni betonu dodawanymi włóknami, a wymagane procesy technologiczne dla tego typu betonów jeszcze bardziej utrudniają zachowanie jednorodności struktury. Pompowany fibrobeton samozagęszczalny powinien być bezpośrednio podawany w miejsce zabetonowania z ograniczeniem poziomego przemieszczania się mieszanki w obrębie formowanej konstrukcji betonowej. Smukłość i udział objętościowy włókien stalowych w mieszance wpływa na pogarszanie się jej urabialności lecz poprawia wytrzymałość, choć nie dla wszystkich rodzajów zastosowanych włókien. Z punktu widzenia urabialności wydaje się właściwym dodawanie włókien krótszych o wyższym udziale objętościowym w mieszance betonowej, co powinno wpłynąć na zachowanie jednorodności struktury formowanego betonu. Należy pamiętać o zróżnicowanym kształcie badanych włókien połączonym z ich zróżnicowaną smukłością. Wskazane jest przeprowadzenie dodatkowych badań, eliminujących nakładanie się czynników zmiennych, charakteryzujących rozpatrywane włókna stalowe.

Literatura / References

1. B. Barragán, R. Zerbino, R. Gettu, M. Soriano., de la Cruz C.: Development and application of steel fibre reinforced self-compacting concrete, 6th RILEM Symposium on Fibre-Reinforced Concretes (FRC) – BEFIB 2004, Varenna, Italy, 457 – 466.
2. Y. Ding, D. Thomaseth, The investigation on the workability and flexural toughness of fibre cocktail reinforced self-compacting high performance concrete, 6th RILEM Symposium on Fibre-Reinforced Concretes – BEFIB 2004, Varenna, Italy, 467 – 478.
3. T. Ponikiewski, Aspekty doboru włókien z punktu widzenia technologii mieszanki betonowej, VI Seminarium reologiczne, Gliwice 2004.
4. T. Ponikiewski, Wpływ włókien stalowych na właściwości reologiczne i mechaniczne betonów samozagęszczalnych, VII Seminarium reologiczne, Gliwice 2005.
5. J. Szwabowski, Reologia mieszanek na spoiwach cementowych, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 1999.
6. J. Szwabowski, T. Ponikiewski: The rheological properties of fresh polypropylene fibre reinforced mortar and concrete, 6th RILEM Symposium on Fibre-Reinforced Concretes (FRC) – BEFIB 2004, Varenna, Italy, 309 – 318.

whole considered block I in the examined range of the addition of 13x0.16 straight fibres was shown. In the first step tests, complete range of self-compacting mixtures modified by steel fibres was shown for two types of wavy fibres 30x0.7 – 50x1.0 and for 6x 0.16 straight fibres. Tests were not conducted for two types of fibres. In the second step tests, complete range of self-compacting mixtures modified by steel fibres due to a variable level of the fibre reinforcement was shown for 25x0.40 straight fibres and 50x0.45, 60x0.65, 30x0.50 hooked fibres. There was no unequivocal influence of the length of the fibres on changes of the rheological parameters of considered mixtures with their addition.

On the basis of Figure 7 it is possible to show the influence of the kind of steel fibres on yield value g of self-compacting mixtures and compressive strength f_c , for volume fraction 2% and fibre factor 0.8. The addition of steel fibres to self-compacting mixtures result in increase of yield value g for all kinds of fibres but in increase of compressive strength only in the case of two types of fibres 50x0.45 and 30x0.7. The biggest increase of yield value g combined with constant value f_c characterizes 25x0.40 fibres for $V_f=2.0\%$. It confirms the necessity of execution wider and more accurate research of the influence of the steel fibres addition on self-compacting as well as mechanical parameters of concrete. It should be mentioned that the smallest increase of yield value g characterize 30x0,7 wavy fibre that is the smallest deterioration of workability with unequivocal increase of compressive strength.

4. Conclusions

On the basis of conducted investigations, it is possible to present the approximate maintenance ranges of self-compactness of mixtures with addition of steel fibres with diversified geometrical parameters and volume fraction in concrete mixture. To keep the self-compacting effect of mixtures modified with steel fibres, the volume fraction of 2,0 % of the fibres in the matrix seems to be recommended and to ensure its maintenance. However, this is not the case with all examined fibres. There are problems with homogeneous fulfillment of concrete space with added fibres and technological processes required for this type of concrete make more difficult to keep the homogeneity of the structure. Pumped self-compacting fibro-concrete should be delivered directly to a forming place, with the limiting of horizontal relocation of the mixture within formed concrete structure. The slenderness and volume fraction of steel fibres in the mixture worsens its workability but improves strength parameters, though not all fibres. The addition shorter fibres in higher volume fraction into concrete mixture seems proper because of workability. This should have an influence upon maintaining homogeneity of the formed concrete structure. It should be remembered about different shape of studied fibres combined with diverse slenderness. Conducting additional research eliminating overlapping variable factors characteristic of considered steel fibres is advisable.