

prof. dr hab. inż. Wiesława Głodkowska<sup>1)</sup>

ORCID: 0000-0003-3719-5350

dr inż. Marek Lehmann<sup>1)\*</sup>

ORCID: 0000-0002-1314-3014

# Load-bearing capacity and strain of the shear area of beams made of fine-aggregate fiber composite

## *Nośność i odkształcenia strefy przypodporowej belek wykonanych z drobnokruszywowego fibrokompozytu*

DOI: 10.15199/33.2024.09.01

**Abstract.** The article presents selected results of shear tests of reinforced concrete beams made of fine aggregate composite with the addition of steel fibers in the amount of 1.2% in relation to the volume of the composite. 20 beams with different shear reinforcement ratio in the form of stirrups, with and without the addition of steel fibers, were tested. The results of tests of the shear capacity and strain of the side surface of beams and stirrups are discussed. The conducted research, which is a part of a wide research program, has show that the elaborated composite with steel fibers, whose properties are similar or better than that of ordinary concrete, can be successfully used to make structural elements in terms of shear resistance. Composite, due to its properties and nature of work in shear conditions, could be an alternative to ordinary concrete in some applications.

**Keywords:** fine aggregate; fibre composite; properties; shear bearing capacity; deformation; failure models.

Concrete is a brittle and poorly deformable material, so it is susceptible to cracking and breaking. In the case of such materials, the addition of fibres, e.g. steel, allows for increasing their plasticity and resistance to cracking. The beginnings of the use of fibre concrete were noted 140 years ago, when in 1874 A. Bernard filed the first patent for concrete reinforced with steel fibres. Since then, attempts have been made to assess the influence of fibres on its properties [1 ÷ 6]. Fibre concrete has become a certain alternative to ordinary concrete. The filling of fibre concrete, like ordinary concrete, is fine and coarse aggregate selected according to a continuous grain-size curve. In Poland, in the Pomerania region, aggregate deposits occur in the form of a mixture of fine and coarse aggregate. The high demand for coarse aggregate led to the development of a technology for its extraction by washing from deposits. This technology was called **hydroclassification**.

Due to the large shortage of coarse aggregate in the northern region of Poland, a composite concrete was developed, the

**Streszczenie.** W artykule przedstawiono wybrane wyniki badań belek żelbetowych na ścinanie wykonanych z drobnokruszywowego fibrokompozytu z dodatkiem włókien stalowych w ilości 1,2% w stosunku do objętości kompozytu. Zbadano nośność na ścinanie dwudziestu belek o różnym stopniu zbrojenia w postaci strzemion, z dodatkiem włókien stalowych i bez włókien. Omówiono wyniki badań nośności oraz odkształcenia powierzchni bocznej belek i strzemion. Przeprowadzone badania, które są fragmentem szerokiego programu, wykazały, że opracowanego fibrokompozytu, którego właściwości są zbliżone lub lepsze od betonu zwykłego, można z powodzeniem użyć do wykonania elementów konstrukcyjnych w aspekcie nośności na ścinanie. Ze względu na właściwości i charakter pracy w warunkach ścinania fibrokompozyt byłby w niektórych przypadkach zastosowania alternatywą dla betonu zwykłego.

**Słowa kluczowe:** drobnokruszywowy fibrokompozyt; właściwości; nośność na ścinanie; odkształcenia; modele zniszczenia.

Beton należy do materiałów kruchych i mało odkształcalnych, jest więc podatny na zarysowania i pęknięcia. W przypadku takich materiałów dodatek włókien, np. stalowych, pozwala na zwiększenie ich plastyczności i odporności na zarysowania. Początki zastosowania fibrobetonu odnotowano 140 lat temu, kiedy w 1874 r. A. Bernard zgłosił pierwszy patent na beton zbrojony włóknami stalowymi. Od tego czasu podejmowane są próby oceny wpływu włókien na jego właściwości [1 ÷ 6]. Fibrobeton stał się więc pewną alternatywą dla betonu zwykłego. Wypełnieniem fibrobetonu, tak jak betonu zwykłego, jest kruszywo drobne i grube dobrane wg ciągłej krzywej uziarnienia. W Polsce, na terenie Pomorza, złoża kruszyw występują w postaci mieszaniny kruszywa drobnego i grubego. Duże zapotrzebowanie na kruszywo grube przyczyniło się do opracowania technologii jego pozyskiwania przez wypłukiwanie ze złóż. Technologię tę nazwano **hydroklasyfikacją**.

Ze względu na duży niedobór kruszywa grubego w regionie północnej Polski opracowano kompozyt cementowy, którego inkluzję stanowi piasek odpadowy pozyskany w procesie hydroklasyfikacji. W drobnokruszywowym kompozycie cementowym kruszywo grube zastąpiono włóknami stalowymi, tworząc tzw. drobnokruszywowy fibrokompozyt

<sup>1)</sup> Politechnika Koszalińska, Wydział Inżynierii Lądowej, Środowiska i Geodezji

\* Correspondence address: marek.lehmann@tu.koszalin.pl

inclusion of which was sand from pa to wy obtained in the hydroclassification process. In the fine-aggregate composite concrete, coarse aggregate was replaced with steel fibers, creating the so-called fine-aggregate fiber composite [6, 7]. Its distinguishing feature is its ability to transfer greater shear forces compared to concrete without dispersed reinforcement. Increasing the shear load-bearing capacity may lead to a reduction of traditional shear reinforcement or to the complete omission of reinforcement due to load-bearing capacity at low loads.

The analysis of the state of knowledge shows that the first work on the load-bearing capacity of concrete fibre elements began in the 1970s. Batson published in [8] the results of research on the influence of the shape, quantity and slenderness of steel fibres on the tensile strength. Based on these studies, he concluded that the stirrup can be replaced with round, flat or notched steel fibres, which effectively do not affect the load-bearing capacity of the supporting areas. In 1986, Sharma [9] conducted research and confirmed the beneficial cooperation of fibres and stirrups, and in 1987, Narayanan and Darwish [10] published the results of research on beams with different volume fractions of corrugated fibres. You in [11] showed that the shear capacity of bent beams increases significantly with the increase in the content of steel fibres, and their appropriate quantity can change the nature of the failure of the element in shear from brittle to ductile. Similar conclusions were drawn in [3, 12, 13]. A review of the state of knowledge on bending shear elements reinforced with fibers was also presented in [14 ÷ 16].

Although there have been many publications devoted to the issue of shearing, there is still a need to conduct further research, especially in the aspect of new materials, such as fine-aggregate fibre composites. The studies published in [6, 17] have shown that fine-aggregate fibre composites without the addition of steel fibres behave like ordinary concrete in bending elements with conventional reinforcement. The addition of steel fibres significantly improves the bending capacity of such elements, which enables the reduction of conventional reinforcement with respect to the bending moment. The addition of steel fibres also limits the width of cracks perpendicular to the axis of the element. These properties enable the use of this material for the production of structural elements such as floor slabs, beams or coatings. Thanks to its mechanical and physical properties, fine-grained fiberglass may, in some cases, constitute an alternative to ordinary concrete.

Taking into account the achievements to date, the aim of the research is to demonstrate that reinforced concrete elements working in shear can be made from fine-aggregate fibrocomposite with a steel fibre content of 1.2% in relation to the mass of the composite. Up to now, as can be seen from the current state of knowledge, no research has been carried out on reinforced concrete elements bent by a transverse force from fine-aggregate fibrocomposite cement. It was therefore assumed that steel fibres, used as non-dispersive reinforcement, can contribute to improving the load-bearing capacity and deformability of such elements, and the stirrup

[6, 7]. Cechą, która go wyróżnia, jest zdolność do przenoszenia większych sił ścinających w porównaniu z betonem bez zbrojenia rozproszonego. Zwiększenie nośności na ścinanie może prowadzić do redukcji tradycyjnego zbrojenia na ścinanie lub całkowitego zrezygnowania ze zbrojenia z uwagi na nośność, przy niewielkich obciążeniach.

Z analizy stanu wiedzy wynika, że pierwsze prace dotyczące ścinania elementów fibrobetonowych rozpoczęto w latach siedemdziesiątych XX wieku. Batson w [8] opublikował wyniki badań nad wpływem kształtu oraz ilości i smukłości włókien stalowych na siłę ścinającą. Na podstawie tych badań doszedł do wniosku, że strzemiona można zastąpić okrągłymi, płaskimi lub karbowanymi włóknami stalowymi, które skutecznie wpływają na nośność na ścinanie obszarów przypodporowych. W 1986 r. Sharma [9] przeprowadził badania i potwierdził korzystną współpracę włókien i strzemion, a w 1987 r. Narayanan i Darwish [10] opublikowali wyniki badań belek z zawartością włókien karbowanych o różnym udziale objętościowym. You w pracy [11] wykazał, że nośność na ścinanie belek zginanych ulega znacznemu zwiększeniu ze wzrostem zawartości włókien stalowych, a odpowiednia ich ilość może zmienić charakter zniszczenia elementu przy ścinaniu z kruchego na ciągliwy. Podobne wnioski sformułowano w pracach [3, 12, 13]. Przegląd stanu wiedzy na temat zginanych elementów ścinanych zbrojonych włóknami przedstawiono także w pracach [14 ÷ 16].

Zagadnieniu ścinania poświęcono wprawdzie wiele publikacji, ale wciąż istnieje potrzeba prowadzenia dalszych badań przede wszystkim w aspekcie nowych materiałów, do jakich należy drobnokruszowy fibrokompozyt. Badania opublikowane w pracach [6, 17] wykazały, że drobnokruszowy kompozyt cementowy bez dodatku włókien stalowych zachowuje się jak beton zwykły w zginanych elementach ze zbrojeniem konwencjonalnym. Dodatek włókien stalowych w istotny sposób poprawia nośność na zginanie takich elementów, dzięki czemu możliwa jest redukcja zbrojenia konwencjonalnego ze względu na moment zginający. Dodatek włókien stalowych ogranicza również szerokość rozwarcia rys prostopadłych do osi elementu. Właściwości te umożliwiają użycia tego materiału do wykonywania elementów konstrukcyjnych, takich jak np. płyty stropowe, belki czy powłoki. Dzięki swoim właściwościom mechaniczno-fizycznym drobnokruszowy fibrokompozyt może, w niektórych przypadkach, stanowić alternatywę dla betonu zwykłego.

Uwzględniając dotychczasowe osiągnięcia, celem badań jest wykazanie, że z drobnokruszowego fibrokompozytu o zawartości włókien stalowych 1,2% w stosunku do masy kompozytu można wykonać zginane elementy żelbetowe pracujące na ścinanie. Do tej pory, jak wynika z obecnego stanu wiedzy, nie prowadzono badań elementów żelbetowych z drobnokruszowego fibrokompozytu cementowego zginanych siłą poprzeczną. Założono więc, że włókna stalowe, użyte jako zbrojenie rozproszone, mogą przyczynić się do poprawy nośności na ścinanie i odkształcalności takich elementów, a strzemiona częściowo można zastąpić włóknami stalowymi. Należy zaznaczyć, że przez zastoso-

can be partially replaced with steel fibres. It should be noted that by using waste aggregate as a fully valuable construction raw material for the production of the tested fibre composite, these studies are part of the global trend related to sustainable development of the environment.

### Test materials

To make the test elements, sand with a grain size of up to 2 mm obtained after the hydroclassification process from the Mineral Raw Materials Mine in Podwilcz, in the Białogard commune (1570 kg/m<sup>3</sup>), CEM II/A-V 42.5R Portland cement (420 kg/m<sup>3</sup>), silica dust (21 kg/m<sup>3</sup>), superplasticizer (16.8 kg/m<sup>3</sup>) and municipal water (160 kg/m<sup>3</sup>) were used. The non-dispersed reinforcement consisted of steel fibres in the amount of 1.2% (94 kg/m<sup>3</sup>) of hook-shaped shape and slenderness  $\lambda = l/d = 62.5$  ( $l = 50$  mm,  $d = 0.8$  mm). The applied fine aggregates meet the requirements for mineral aggregates recommended for the production of ordinary concrete. The content of mineral dust in the aggregate is less than 3%, which allows them to be classified in the category according to the standard PN-EN 12620 [18]. The fine-aggregate composite matrix was designed using an analytical and experimental method [6]. Modification of its composition by adding silica dust and a plasticizing admixture allowed obtaining a w/c ratio of 0.38. The fibers in the composite mixture were arranged randomly.

### Methodology of Research and Test Elements

The characteristics of the reinforced concrete beams are presented in Table. Additionally, test elements were made in the form of cylinders (150 x 300 mm, 30 pcs. for the composite with and without fibres) and beams (150 x 150 x 700 mm, 30 pcs. for the composite with fibres and 10 pcs. for the composite without fibres) in order to determine the basic properties of the fibre composite (Table), such as; compressive strength ( $f_{c,f}$ ), compressive and tensile strength of the composite without fibres ( $f_c, f_{ct}$ ); residual strength for CMOD = 0,5, 1,5, 2,5 and 3,5 mm ( $f_{R,1}, f_{R,2}, f_{R,3}, f_{R,4}$ ) and modulus of elasticity ( $E_{cm}$ ).

The large reinforcement area assumed in the elements in the tensile zone (2#20 and 2#16) results from forcing the beams to fail on them. In order to avoid the bow effect and the large influence of the

sowanie kruszywa odpadowego, jako pełnowartościowego surowca budowlanego do wytworzenia badanego fibrokompozytu, badania te wpisują się w ogólnoswiatową tendencję związaną ze zrównoważonym rozwojem środowiska.

### Materiały użyte w badaniach

Do wykonania próbných elementów użyto piasku o uziarnieniu do 2 mm pozyskanego po procesie hydroklasyfikacji z Kopalni Surowców Mineralnych w Podwilczu, w gminie Białogard (1570 kg/m<sup>3</sup>), cementu portlandzkiego CEM II/A-V 42,5R (420 kg/m<sup>3</sup>), pyłu krzemionkowego (21 kg/m<sup>3</sup>), superplastyfikatora (16,8 kg/m<sup>3</sup>) oraz wody z wodociągu miejskiego (160 kg/m<sup>3</sup>). Zbrojenie rozproszone stanowiły włókna stalowe w ilości 1,2% (94 kg/m<sup>3</sup>) o kształcie haczykowatym i smukłości  $\lambda = l/d = 62,5$  ( $l = 50$  mm,  $d = 0,8$  mm). Zastosowane kruszywo drobne spełnia wymagania stawiane kruszywom mineralnym zalecanym do wytwarzania betonu zwykłego. Zawartość pyłów mineralnych w kruszywie jest mniejsza niż 3%, co pozwala zakwalifikować je do kategorii wg normy PN-EN 12620 [18]. Matrycę kompozytu drobnokruszywowego zaprojektowano metodą analityczno-doświadczalną [6]. Zmodyfikowanie jej składu przez zastosowanie dodatku pyłów krzemionkowych oraz domieszki uplastyczniająco-upłynniającej pozwoliło na uzyskanie stosunku w/c = 0,38. Włókna w mieszance kompozytu rozmieszczone były w sposób przypadkowy.

### Metoda badań i elementy próbne

Charakterystykę belek żelbetowych przedstawiono w tabeli. Dodatkowo wykonano elementy próbne w postaci walców (150 x 300 mm, po 30 szt. w przypadku kompozytu z włóknami i bez) oraz beleczek (150 x 150 x 700 mm, 30 szt. w przypadku kompozytu z włóknami i 10 szt. kompozytu bez włókien) w celu wyznaczenia podstawowych właściwości fibrokompozytu (tabela), takich jak; wytrzymałość na ściskanie ( $f_{c,f}$ ), wytrzymałość na ściskanie i rozciąganie kompozytu bez włókien ( $f_c, f_{ct}$ ); wytrzymałość resztkowa dla CMOD = 0,5; 1,5; 2,5 i 3,5 mm ( $f_{R,1}, f_{R,2}, f_{R,3}, f_{R,4}$ ) oraz moduł sprężystości ( $E_{cm}$ ).

Przyjęta w elementach duża powierzchnia zbrojenia w strefie rozciąganej (2#20 i 2#16) wynika z wymuszenia zniszczenia belek na ścinanie. W celu uniknięcia efektu łuku oraz dużego wpływu zbrojenia podłużnego na siłę tnącą, odcinek ścinania  $a$  (tabela) ustalono w taki sposób, aby smukłość ścinania

#### Specification of the tested elements

Opis badanych elementów

Beam mark./ Oznaczenie belki	Description of beams and technical characteristics of materials/Opis belek i charakterystyka techniczna materiałów	Stirrups/ Strzemiona	Fiber/Ilość włókien [%]
B (4 pcs./szt.)		-	0
BF (pcs./4 szt.)		-	1,2
BSa (4 pcs./szt.)		#4.5 @ 120/ co 120	0
BSb (2 pcs./szt.)	composite properties/właściwości kompozytu:	#4.5 @ 90/ co 90	0
BFSa (4 pcs./szt.)	$f_c = 52,6$ MPa; $f_{ct} = 3,3$ MPa $f_{c,f} = 64,4$ MPa $f_{R,1} = 9,27$ MPa; $f_{R,2} = 8,80$ MPa	#4.5 @ 120/ co 120	1,2
BFSb (2 pcs./szt.)	$f_{R,3} = 7,87$ MPa; $f_{R,4} = 6,98$ MPa $E_{cm} = 36,7$ MPa	#4.5 @ 90/ co 90	1,2
	steel properties/ właściwości stali:		
	$f_y = 529$ MPa $f_t = 650$ MPa $E_s = 200,4$ GPa $f_{yw} = 584$ MPa $f_{tw} = 615$ MPa		

longitudinal reinforcement on the shear force, the shear section  $a$  (Table) was set so that the shear slenderness  $a/d = 3$ . In the beams of series B and BF, the reinforcement was intentionally placed in the compression zone (2#12) due to its significant influence on the shear capacity. The test elements were stored at a temperature of  $20 \pm 2^\circ\text{C}$  and a relative humidity of 100% until the tests. After 30 days they were subjected to load

The test stand for testing the load-bearing capacity of beams on the wall is shown in Photo 1. The beams were tested on a specially designed stand in the inverted beam freely supported by a pair of supports (Photo 1, Table). They were loaded at a constant rate of  $\sim 4$  kN/min until failure. Two measurement techniques were used during the test: SAD-256 data acquisition (Photo 1a) and the Aramis 4M system (Photo 1b).

The measurements were taken cyclically at a frequency of 0.5 Hz from the moment the load was applied until the beams were destroyed. The SAD-256 system sensor system for measuring the deformation of one side surface of the beams was designed to enable recording of deformation in the area where the diagonal crack was formed. The deformation of the other side surface of the beam and the deflection were measured using the Aramis 4M

program. To measure the deformation of the reinforcement on the walls, electrical resistance tensometers glued to the vertical stirrup arms were used. Six tensometers were used for each beam, three for each support zone. The force acting on the beams was recorded by a force gauge placed above a 0.66 mV/V actuator. The span of the beams (Table) was selected so that their shear failure at one or the other support could be recorded by the Aramis 4M program. Due to the adopted static scheme, it could have occurred in the zone of one or the other support. For this reason, the beams were tested in two stages. In the first stage, the beam was subjected to a load until it was destroyed by the shear force. Then, the test was stopped without „ruining” the load on the beam. A steel corset

made of sections fastened with bolts was placed on the damaged zone at the support (Photo 2). The corset was designed to transfer transverse forces in the damaged support zone in the second stage of the test. The beams with the steel corset were loaded until the second support zone was destroyed.

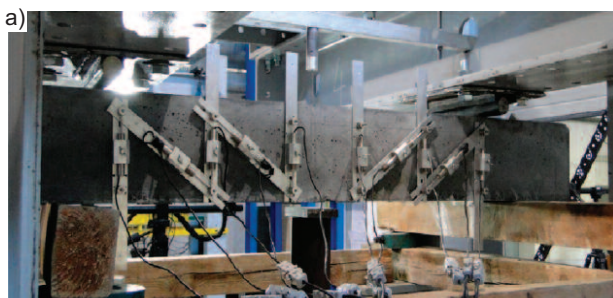
wynosiła  $a/d = 3$ . W belkach serii B i BF celowo umieszczono zbrojenie w strefie ściskanej (2#12) ze względu na jego istotny wpływ na nośność na ścinanie. Elementy próbne do czasu badania, przez okres 28 dni, przechowywano w temperaturze  $20 \pm 2^\circ\text{C}$  i wilgotności względnej 100%. Po 30 dniach poddano je obciążeniu.

Stanowisko do badania nośności belek na ścinanie pokazano na fotografii 1. Belki badano na specjalnie zaprojektowanym stendzie w schemacie odwróconej belki swobodnie podpartej (fotografia 1, tabela).

Obciążano je ze stałą prędkością  $\sim 4$  kN/min, aż do zniszczenia. Podczas badania użyto dwóch technik pomiarowych: akwizycji danych SAD-256 (fotografia 1a) oraz systemu Aramis 4M (fotografia 1b).

Pomiary wykonywano cyklicznie z częstotliwością 0,5 Hz od chwili przyłożenia obciążenia aż do chwili zniszczenia belek. Układ czujników systemu SAD-256 do pomiaru odkształceń jednej powierzchni bocznej belek został tak zaprojektowany, aby możliwa była rejestracja odkształceń w obszarze powstania rysy ukośnej. Odkształcenia drugiej powierzchni bocznej belki oraz ugięcia mierzono programem Aramis 4M. Do pomiaru odkształceń zbrojenia na ścinanie wykorzystano tenso-

metry elektrooporowe przyklejone do pionowych ramion strzemion. Na każdą belkę przypadało po sześć tensometrów, po trzy na każdą strefę przypodporową. Siłę obciążającą belki rejestrował siłomierz umieszczony nad siłownikiem o czułości 0,66 mV/V. Rozpiętość belek (tabela) została tak dobrana, aby ich zniszczenie na ścinanie, przy jednej lub drugiej podpory, było możliwe do zarejestrowania przez program Aramis 4M. Z uwagi na przyjęty schemat statyczny mogło nastąpić w strefie jednej lub drugiej podpory. Z tego powodu badanie belek wykonano w dwóch etapach. W pierwszym belka została poddana obciążeniu do chwili zniszczenia na ścinanie. Następnie wstrzymywano badanie „zerując” obciążenie belki. Na zniszczoną strefę przypodporową załóżono stalowy gorset, wykonany z kształtowników, ściąganych śrubami (fotografia 2). Gorset miał za zadanie przeniesienie siły poprzecznej w zniszczonej strefie przypodporowej w drugim etapie badania. Belki z gorsetem stalowym obciążano aż do zniszczenia drugiej strefy przypodporowej.



**Photo 1. Stand for shear capacity testing of bend elements: a) beam side surface tested using SAD-256 system; b) beam side surface tested using Aramis 4M system**

*Fot. 1. Stanowisko do badań nośności na ścinanie zginanych elementów: a) powierzchnia boczna belki badana przy użyciu systemu SAD-256; b) powierzchnia boczna belki badana przy użyciu systemu Aramis 4M*



**Photo 2. Beam reinforced with steel corset after the first testing stage**  
*Fot. 2. Widok belki wzmocnionej stalowym gorsetem, po pierwszym etapie badania*

## Test Results and Their Analysis

**Failure models of beams and experimental load-bearing capacity of the shear.** Different failure models occurred in the tests, depending on the type of reinforcement used and its combination (Table). Failure of type B beams, without reinforcement due to the shear, and of beams with only dispersed reinforcement (type BF beams) had a shear tension failure (Photo 3). After the first diagonal cracks had formed, one of the cracks increased in width with increasing load.

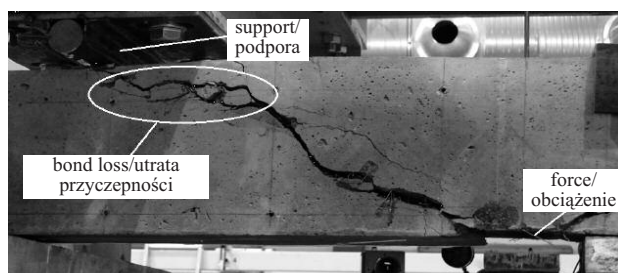
Many small cracks appeared on the main reinforcement level, which is equivalent to a gradual loss of adhesion of the main reinforcement to the fiber composite. As a result, the exhaustion of the load-bearing capacity of such elements occurred due to the slippage of the main reinforcement steel at the point of anchorage to the support. In the case of the BFSa series beams (elements with stirrups spaced

120 mm apart), the failure mode was similar to the one discussed, but only with the feature of failure of the shear on it – bending. Such a failure model was a consequence of the high load-bearing capacity of the BSFa series beams. It occurs in the case of beams with insufficient bending reinforcement over their entire span. Then the yield strength of the main reinforcement steel is reached, but not in the middle of the element span, but in the section of simultaneous action of the bending moment and the transverse force. This results in an increase in the opening of one of the diagonal cracks, its elongation and penetration into the compressed zone of the cross-section. This crack effectively causes crushing of the concrete in the cross-section above the crack, therefore the second stage of testing of this series of beams, the task of which was to determine the load-bearing capacity of the undamaged support zone, ended in failure. In this case, the beams were destroyed due to bending. In most of the beams of the BFSa series (beams with a stirrup spacing of 120 mm) and the BSa series (beams with a stirrup spacing of 120 mm, without the addition of steel fibres) it was found that the stirrups through which the diagonal crack passed had broken. The failure of the BFSb series beams (beams with a stirrup spacing of 90 mm), which were characterized by the greatest load-bearing capacity on the shear, occurred due to plasticization of the main reinforcement (failure of the beams on bending). Ultimately, under the influence of large deformations, the compression zone on the element was crushed. As a result, secondary failure of the shear occurred diagonal tension failure.

Figure 1 shows the average values of the  $V_{cr}$  force (the shear force at which the diagonal crack appears) and the  $V_{ult}$  force (the maximum shear failure force) for each series of beams. The analysis of the test results shows that the highest values of the shear force ( $V_{cr}$ ), at which the diagonal crack appears, and the greatest failure force ( $V_{ult}$ ) occurred in the case of beams reinforced with stirrups and steel fibres. Reducing the

## Wyniki badań i ich analiza

**Modele zniszczenia belek i eksperymentalna nośność na ścinanie.** W badaniach wystąpiły różne modele zniszczenia, w zależności od użytego rodzaju zbrojenia na ścinanie i jego kombinacji (tabela). Zniszczenie belek typu B, bez zbrojenia z uwagi na ścinanie oraz belek tylko ze zbrojeniem rozproszonym (belki typu BF) miało charakter ścinająco-poślizgowy (fotografia 3). Po powstaniu pierwszych rys ukośnych, wraz ze wzrostem obciążenia, jedna z rys zwiększała szerokość rozwarcia. Na poziomie zbrojenia głównego pojawiło się wiele drobnych rys, co jest równoznaczne ze stopniową utratą przyczepności zbrojenia głównego do fibrokompozytu. W rezultacie wyczerpanie nośności takich elementów nastąpiło na skutek poślizgu stali zbrojenia głównego w miejscu zakotwienia na podporze. W przypadku belek serii BFSa (elementy ze



**Photo 3. Example of a shear tension failure in the shear area of BF series beams**

*Fot. 3. Przykładowa postać zniszczenia ścinająco-poślizgowego strefy przypodporowej belek BF*

strzemionami w rozstawie co 120 mm) sposób zniszczenia był podobny do omówionego, ale tylko z cechą zniszczenia ścinająco-zginającego. Taki model zniszczenia był konsekwencją dużej nośności na ścinanie belek serii BSFa. Występuje on w przypadku belek z niedostatecznym zbrojeniem na zginanie na całej ich rozpiętości. Następuje wówczas osiągnięcie granicy plastyczności stali zbrojenia głównego, ale nie w środku rozpiętości elementu, lecz na odcinku jednoczesnego działania momentu zginającego i siły poprzecznej. Skutkuje to zwiększeniem rozwarcia jednej z rys ukośnych, jej wydłużeniem i penetracją do ściskanej strefy przekroju. Rysa ta w efekcie powoduje miażdżenie betonu w przekroju nad rysą, dlatego też drugi etap badania tej serii belek, którego zadaniem było określenie nośności niezniszczonej strefy przypodporowej, zakończył się niepowodzeniem. W tym przypadku belki zniszczyły się ze względu na zginanie. W większości belek serii BFSa (belki o rozstawie strzemion 120 mm) i belek serii BSa (belki o rozstawie strzemion 120 mm, bez dodatku włókien stalowych) stwierdzono zerwanie strzemion, przez które przechodziła rysa ukośna. Zniszczenie belek serii BFSb (belki o rozstawie strzemion 90 mm), które charakteryzowały się największą nośnością na ścinanie, nastąpiło przez uplastycznienie zbrojenia głównego (zniszczenie belek na zginanie). Ostatecznie, pod wpływem dużych odkształceń, zmiażdżeniu uległa strefa ściskana elementu. W efekcie nastąpiło wtórne zniszczenie na ścinanie typu ścinająco-zginającego.

Na rysunku 1 przedstawiono średnie wartości siły  $V_{cr}$  (siła tnąca, przy której pojawia się rysa ukośna) oraz siły  $V_{ult}$  (maksymalna siła niszcząca na ścinanie) w przypadku poszczególnych serii belek. Z analizy wyników badań wynika, że największe wartości siły tnącej ( $V_{cr}$ ), przy której zaobserwowano pojawienie się rysy ukośnej oraz siły niszczącej ( $V_{ult}$ ), wystąpiły w przypadku belek zbrojonych strzemionami i włóknami stalowymi. Zmniejszenie rozstawu strzemion z 120 do 90 mm przyczyniło się do

stirrup spacing from 120 to 90 mm contributed to increasing the load-bearing capacity of the wall elements by an average of 23% in the case of beams without fibres and by 13% in the case of beams with fibres.

Analyzing the tested results for beams reinforced only with stirrups and only with steel fibres, a slightly higher load-bearing capacity was found for beams without stirrups. In comparison with BFSa beams, the tested  $V_{ult}$  forces were lower by: 40% in the case of BSA beams and by 26% in the case of BF beams, respectively. Despite

the fact that the addition of the second type of reinforcement to the walls does not give a smaller strengthening effect, the influence of steel fibres and stirrups on the load-bearing capacity of the walls is not cumulative, as indicated by the results obtained for the BFSa and BFSb series beams. Similar conclusions were reached by other authors who analysed the cooperation of stirrups with steel fibres in terms of transferring river forces [11 ÷ 13, 19]. Our studies have also shown that non-dispersed reinforcement has a positive effect on the appearance of the first diagonal crack compared to beams without steel fibres. The value of the transverse cracking force ( $V_{cr}$ ) in fibre composite elements is higher by about 38% compared to beams without dispersed reinforcement. In beams of the BF, BSA and BFSa series, the ratio of the cracking force ( $V_{cr}$ ) to the maximum shearing force ( $V_{ult}$ ) was constant and amounted to about 0.56. The slight increase in the  $V_{ult}$  force in relation to  $V_{cr}$  in the case of series B beams resulted from the transfer of the beam force to it by the so-called dowel action, the interlocking of the crushed beam and the compression zone.

**Strain of the side surfaces of beams and stirrups.** The addition of steel fibres in the fine-grained composite has a very large effect on the transfer of transverse forces. It increases the load-bearing capacity at support by approx. 90% in beams without stirrups and by approx. 65% in beams with stirrups. The nature of the work of fibres in the support zone is more favourable than that of stirrups due to the more continuous nature of the material (figures 2 ÷ 4). It was also found that when transferring transverse forces, the influence of steel fibres and stirrups is added up to increase the load-bearing capacity of the element, while the density of stirrups does not significantly affect the cracking force  $V_{cr}$  of beams with and without fibres. Similar results were presented in [20]. It was found that since the load-bearing capacity of BF and BSb series beams is comparable, the #4.5 stirrup at 90 mm spacing strengthens the beam to the same extent as steel fibres in the amount of 94 kg/m<sup>3</sup> (1.2%).

Considering the  $\varepsilon_y - V$  relationship for the BFSa series beams (Fig. 2), it was found that the participation of fibres and stirrups in the transfer of river forces not only contributes to the

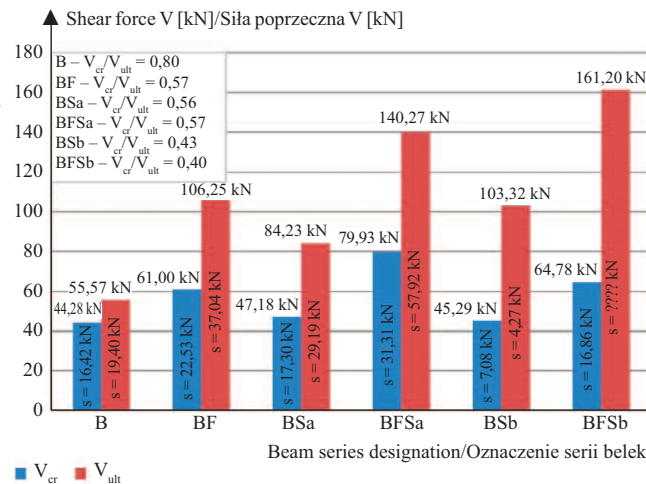


Fig. 1. Average values of  $V_{cr}$  and  $V_{ult}$  forces for individual beam series  
Rys. 1. Średnie wartości sił  $V_{cr}$  i  $V_{ult}$  dla poszczególnych serii belek

zwiększenia nośności elementów na ścinanie średnio o 23% w przypadku belek bez włókien i o 13% belek z włóknami. Analizując badane wyniki belek zbrojonych tylko strzemionami i tylko włóknami stalowymi, nieco większą nośność stwierdzono w przypadku belek bez strzemion. W porównaniu z belkami BFSa badane siły  $V_{ult}$  były mniejsze odpowiednio o 40% w przypadku belek BSA i o 26% belek BF. Pomimo tego, że dodatek drugiego rodzaju zbrojenia na ścinanie daje mniejszy efekt wzmocnienia, wpływ włókien stalowych i strzemion na nośność na ścinanie sumuje się, na co wskazują wyniki uzyskane w przypadku belek serii BFSa i BFSb. Do podobnych wniosków doszli również inni autorzy analizujący współpracę strzemion z włóknami stalowymi w aspekcie przenoszenia siły poprzecznej [11 ÷ 13, 19]. Nasze badania wykazały również, że zbrojenie rozproszone korzystnie wpływa na pojawienie się pierwszej rysy ukośnej w porównaniu z belkami bez włókien stalowych. Wartość poprzecznej siły rysującej ( $V_{cr}$ ) w elementach fibrokompozytowych jest większa o ok. 38% w porównaniu z belkami bez zbrojenia rozproszonego. W belkach serii BF, BSA oraz BFSa stosunek wartości siły rysującej ( $V_{cr}$ ) do maksymalnej siły tnącej ( $V_{ult}$ ) był stały i wynosił ok. 0,56. Niewielki wzrost siły  $V_{ult}$  w stosunku do  $V_{cr}$  w przypadku belek serii B wynikał z przenoszenia siły ścinającej przez tzw. efekt klockujący, zazębianie się kruszywa i strefę ścisną.

**Odkształcenia powierzchni bocznych belek i strzemion.** Dodatek włókien stalowych w drobnokruszywowym kompozycie ma bardzo duży wpływ na przenoszenie sił poprzecznych. Zwiększa nośność przypodporową o ok. 90% w belkach bez strzemion i o ok. 65% w belkach ze strzemionami. Charakter pracy włókien w strefie przypodporowej jest korzystniejszy od pracy strzemion ze względu na bardziej ciągliwy charakter materiału (rysunki 2 ÷ 4). Stwierdzono także, że przy przenoszeniu sił poprzecznych wpływ włókien stalowych i strzemion sumuje się w zwiększaniu nośności elementu, a zagęszczenie strzemion nie wpływa w sposób istotny na siłę rysującą  $V_{cr}$  belek z włóknami i bez włókien. Podobne rezultaty przedstawiono w pracy [20]. Stwierdzono, że skoro nośność belek serii BF i BSb jest porównywalna, to strzemiona #4,5 w rozstawie co 90 mm wzmacniają belki w takim samym stopniu, jak włókna stalowe w ilości 94 kg/m<sup>3</sup> (1,2%).

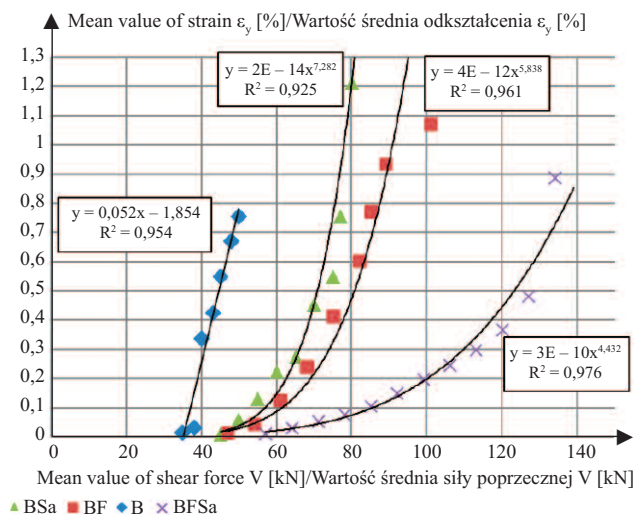
Rozpatrując zależność  $\varepsilon_y - V$  w przypadku belek serii BFSa (rysunek 2) stwierdzono, że udział włókien i strzemion w przenoszeniu sił poprzecznych nie tylko przyczynia się do zwiększenia nośności na ścinanie belek wykonanych z drobnokruszywowego fibrokompozytu. Zaobserwowano bowiem również bardziej płaski kształt krzywej  $\varepsilon_y - V$  w porównaniu z krzywymi uzyskanymi w przypadku belek zbrojonych strzemionami (BSa) oraz

increase in the shear capacity of the beams made of fine-aggregate fibre composite. A flatter shape of the  $\varepsilon_y - V$  curve was also observed in comparison with the curves obtained for the beams reinforced with stirrups (BSa) and the beams with only steel fibres (BF). Moreover, the level of deformation (approx. 0.9%) corresponding to the maximum transverse force ( $V$ ) is slightly lower compared to the BSa series beams (approx. 1.2%) and the BF series beams (approx. 1.1%).

Figure 3 shows the dependence of the average deformations of the lateral surface at the height of the element ( $\varepsilon_y$ ) on the average value of the transverse force ( $V$ ) for the beams with dense stirrups (BSb and BFSb). Comparing the graphs of the  $\varepsilon_y - V$  curves for the BF and BSb series beams, it can be clearly stated that despite small differences in achieving the maximum values of the transverse force, the curves in both cases are similar. It follows that the fibre content of 1.2% is equivalent to the reinforcement of the non-bearing walls in the form of #4.5 stirrups every 90 mm not only from the point of view of load-bearing capacity but also from the point of view of deformations at the height of the element. Figure 4 shows the  $\varepsilon_y - V$  curves for the beams (BFSa and BFSb) for which the highest load-bearing capacity was achieved. The increase in

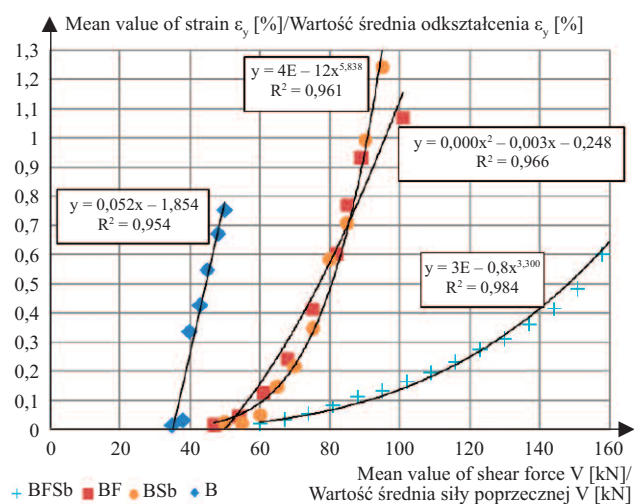
the stirrup density from 120 to 90 mm resulted in the lowest deformations of all tested elements (approx. 0.6%), while at the same time obtaining a very flat  $\varepsilon_y - V$  curve. Analyzing the course of the final deformations of the BFSb beams, it can be additionally stated that the shear failure could not have occurred at a transverse force slightly greater than that occurring at the failure moment. Therefore, it is reasonable to assume the transverse forces at the moment of failure as the minimum load-bearing capacity of these beams.

Figure 5 shows the dependence of the average values of the stirrup strains ( $\varepsilon_s$ ) on the average value of the transverse force ( $V$ ). The analysis covers stirrups on which extensometers were glued. The presented results of the average values of the stirrup



**Fig. 2. Dependence of the side surface strain at element height ( $\varepsilon_y$ ) on the transversal force ( $V$ ) for B, BSa, BF, BFSa series beams at the first stage of the test**

*Rys. 2. Zależność odkształceń powierzchni bocznej na wysokości elementu ( $\varepsilon_y$ ) od siły poprzecznej ( $V$ ) w przypadku belek serii B, BSa, BF, BFSa w pierwszym etapie badania*



**Fig. 3. Dependence of the side surface strain at element height ( $\varepsilon_y$ ) on the transversal force ( $V$ ) for B, BF, BSb and BFSb series beams at the first stage of the test**

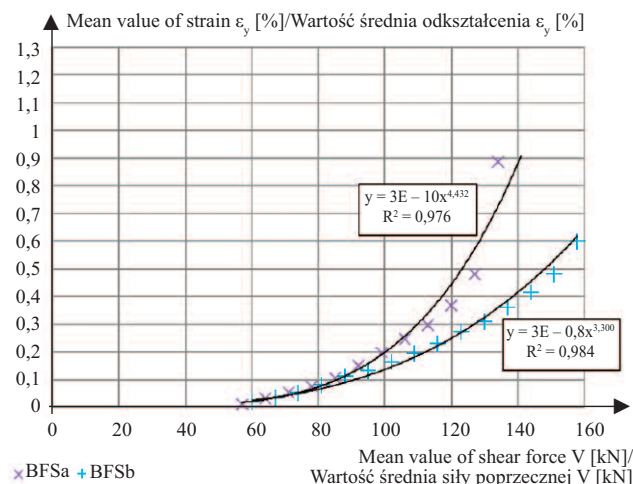
*Rys. 3. Zależność odkształceń powierzchni bocznej na wysokości elementu ( $\varepsilon_y$ ) od siły poprzecznej ( $V$ ) w przypadku belek serii B, BF, BSb i BFSb w pierwszym etapie badania*

belek tylko z włóknami stalowymi (BF). Ponadto poziom odkształceń (ok. 0,9%) odpowiadający maksymalnej sile poprzecznej ( $V$ ) jest nieznacznie mniejszy w porównaniu z belkami serii BSa (ok. 1,2%) i belkami serii BF (ok. 1,1%).

Rysunek 3 przedstawia zależność średnich odkształceń powierzchni bocznej na wysokości elementu ( $\varepsilon_y$ ) od średniej wartości siły poprzecznej ( $V$ ) w przypadku belek z zagęszczonymi strzemiionami (BSb i BFSb). Porównując wykresy krzywych  $\varepsilon_y - V$  dla belek serii BF i BSb, jednoznacznie można stwierdzić, że pomimo niewielkich różnic w osiągnięciu wartości maksymalnych siły poprzecznej, krzywe w obu przypadkach są podobne. Wynika z tego, że zawartość włókien w ilości 1,2% stanowi odpowiednik zbrojenia na ścinanie w postaci strzemiion #4,5 co 90 mm nie tylko z punktu widzenia nośności, ale również w aspekcie odkształceń na wysokości elementu. Rysunek 4 przedstawia krzywe  $\varepsilon_y - V$  dotyczące belek (BFSa i BFSb), w przypadku których uzyskano największą nośność na ścinanie. Zagęszczenie strzemiion ze 120 na 90 mm powoduje uzyskanie najmniejszych odkształceń ze wszystkich badanych elementów (ok. 0,6%), przy jednocześnie bardzo płaskiej krzywej  $\varepsilon_y - V$ . Analizując przebieg końcowych odkształceń belek BFSb, można dodatkowo stwierdzić, że zniszczenie na ścinanie mogło nastąpić przy niewiele większej sile poprzecznej od występującej przy momencie niszczącym. Tym samym przyjęcie sił poprzecznych przy działaniu momentu niszczącego, jako minimalnych nośności na ścinanie tych belek, jest zasadne.

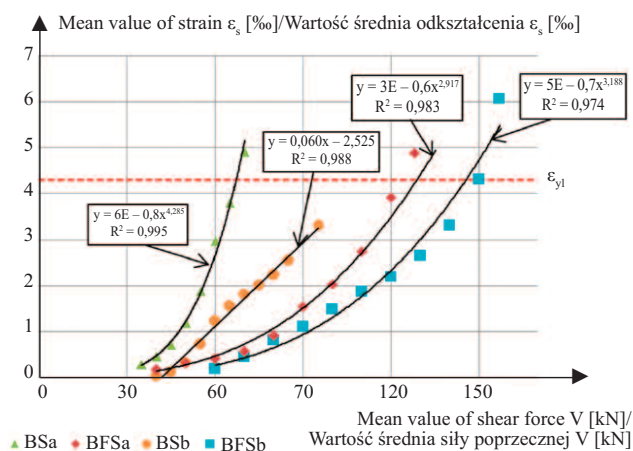
Na rysunku 5 przedstawiono zależność średnich wartości odkształceń strzemiion ( $\varepsilon_s$ ) od średniej wartości siły poprzecznej ( $V$ ). Analiza obejmuje strzemiiona, na które naklejono ekstensometry. Zaprezentowane wyniki średnich wartości odkształceń strzemiion ( $\varepsilon_s$ ) dotyczą zbrojenia, które było najbardziej wyciągnięte i przez które przechodziła rysa ukośna. Odkształcenia strzemiion przyjmują w początkowych fazach obciążenia wartości mniejsze od 0,1%. Gwałtowny wzrost odkształceń inicjuje pojawienie się rysy ukośnej, co zostało po-

strains ( $\epsilon_s$ ) refer to the reinforcement that was the most strained and through which the diagonal crack passed. The stirrup strain is assumed to be less than 0.1‰ in the initial stages of loading. A rapid increase in deformation initiates the appearance of a diagonal crack, which was confirmed in [21] and in Figure 5. In the case of the BFS series beams, it was observed that at the horizontal transverse force of about 60 kN, which is greater than in the case of beams with only stirrups (about 40 kN), the stirrups take part in transferring the load. It follows from Figure 5 that the stirrup deformation, with increasing transverse force, takes on a smaller value in the case of beams with fibres for both 120 and 90 mm stirrup spacing. The difference in the maximum values of the stirrup deformation results from the  $\sigma$ - $\epsilon$  characteristic of the steel and ranges from 3.7 to 7.5‰. The graphs of the deformation of the stirrups confirm the assumptions of the RILEM TC-162 TDF and Model Code 2010 design methods, in which the effects of the work of the stirrups and the distributed reinforcement are summed up. No significant changes were found in the deformation course of the beams without steel fibres when the stirrup spacing was increased from 120 to 90 mm, and the addition of fibres in only one beam BFSb caused the mildest increase in the mean deformation  $\epsilon_s$  (Figure 5). Thus, it cannot be unequivocally stated that thickening the stirrups by 30 mm significantly improves their performance in terms of deformation. It should also be noted that in the case of BFSb beams, where the destruction occurred as a result of exhaustion of the bending capacity, the stirrup underwent plasticization. This lends credence once again to the assumption that the load-bearing capacity of these beams could not have been achieved just before the bending failure. The analysis of the results of the tests on the deformation of the stirrups presented in Figure 5 also confirms the mechanism of the work of the classical reinforcement on the shear, where after plasticization and reaching the value of the deformation  $\epsilon_{yp}$ , their value decreases, which, despite the increase in the transverse force, is caused by the greater strain of the neighboring stirrups or by the transfer of the force by the longitudinal reinforcement and the compression zone



**Fig. 4. Dependence of the side surface strain at element height ( $\epsilon_y$ ) on the transversal force ( $V$ ) for BFSa and BFSb series beams at the first stage of the test**

Rys. 4. Zależność odkształceń powierzchni bocznej na wysokości elementu ( $\epsilon_y$ ) od siły poprzecznej ( $V$ ) belek serii BFSa i BFSb w pierwszym etapie badania



**Fig. 5. Dependence of mid strain of stirrups ( $\epsilon_s$ ) on the transversal force ( $V$ ) for BSA, BFSa, BSb and BFSb series beams at the first stage of the test**

Rys. 5. Zależność odkształceń strzemion ( $\epsilon_s$ ) od siły poprzecznej ( $V$ ) w przypadku belek serii BSA, BFSa, BSb i BFSb w pierwszym etapie badania

że zagęszczenie strzemion o 30 mm poprawia w znaczny sposób ich pracę w ujęciu odkształceń. Należy również zaznaczyć, że w przypadku belek BFSb, gdzie zniszczenie nastąpiło wskutek wyczerpania nośności na zginanie, strzemiona uległy uplastycznieniu. Uwiarygadnia to po raz kolejny założenie, że nośność tych belek na ścinanie mogła zostać osiągnięta tuż przed zniszczeniem na zginanie. Analiza wyników badań odkształceń strzemion przedstawionych na rysunku 5 potwierdza również mechanizm pracy klasycznego zbrojenia na ścinanie, gdzie po uplastycznieniu i osiągnięciu wartości odkształceń  $\epsilon_{yp}$  następuje spadek ich wartości, który pomimo wzrostu siły poprzecznej spowodowany jest większym wytężeniem sąsiednich strzemion lub przenoszeniem siły przez zbrojenie podłużne i pas strefy ściskanej [21]. Analizując wykresy ( $V$ ) – ( $\epsilon_s$ ) można zaobserwować nierównomierną pracę strzemion w strefie przypodporowej. Wynika to z fak-

twierdzone w pracy [21] oraz na rysunku 5. W przypadku belek serii BFS zaobserwowano, że na poziomie siły poprzecznej równej ok. 60 kN, a więc większej niż w przypadku belek z samymi strzemionami (ok. 40 kN), strzemiona biorą udział w przenoszeniu obciążenia. Z rysunku 5 wynika, że odkształcenia strzemion, wraz ze wzrostem siły poprzecznej, przyjmują mniejszą wartość w przypadku belek z włóknami zarówno w rozstawie strzemion 120, jak i 90 mm. Różnica w wartościach maksymalnych odkształceń strzemion wynika z charakterystyki  $\sigma$ - $\epsilon$  stali i wynosi od 3,7 do 7,5‰. Wykresy odkształceń strzemion potwierdzają założenia metod wymiarowania RILEM TC-162 TDF i Model Code 2010, w których sumowane są wpływy pracy strzemion i zbrojenia rozproszonego. Nie stwierdzono większych zmian w przebiegu odkształceń belek bez włókien stalowych w przypadku zagęszczenia rozstawu strzemion ze 120 do 90 mm, a dodatek włókien tylko w jednej belce BFSb spowodował najbardziej łagodny przyrost średnich odkształceń  $\epsilon_s$  (rysunek 5). Tym samym nie można jednoznacznie stwierdzić,

że zagęszczenie strzemion o 30 mm poprawia w znaczny sposób ich pracę w ujęciu odkształceń. Należy również zaznaczyć, że w przypadku belek BFSb, gdzie zniszczenie nastąpiło wskutek wyczerpania nośności na zginanie, strzemiona uległy uplastycznieniu. Uwiarygadnia to po raz kolejny założenie, że nośność tych belek na ścinanie mogła zostać osiągnięta tuż przed zniszczeniem na zginanie. Analiza wyników badań odkształceń strzemion przedstawionych na rysunku 5 potwierdza również mechanizm pracy klasycznego zbrojenia na ścinanie, gdzie po uplastycznieniu i osiągnięciu wartości odkształceń  $\epsilon_{yp}$  następuje spadek ich wartości, który pomimo wzrostu siły poprzecznej spowodowany jest większym wytężeniem sąsiednich strzemion lub przenoszeniem siły przez zbrojenie podłużne i pas strefy ściskanej [21]. Analizując wykresy ( $V$ ) – ( $\epsilon_s$ ) można zaobserwować nierównomierną pracę strzemion w strefie przypodporowej. Wynika to z fak-



[21]. Analyzing the  $(V) - (\varepsilon_y)$  graphs, it is possible to observe uneven work of the stirrups in the support zone. This results from the fact of diagonal crack propagation, where according to Stratford [22] the stirrups may be most strained in the place where the diagonal crack runs closer to the tensile reinforcement, and least in the area where it is limited by the compressed zone. At the same time, it should be emphasized that not all stirrups experienced plasticization of the steel, which can be explained by the appearance of another diagonal crack, i.e. by the work of the neighboring stirrup or by a change in the trajectory of the existing diagonal crack. The plasticization of the steel stirrups occurred at different levels of transverse force, from 76 to 97% of the destructive force. Similar results were observed in the studies by Breveglieri [23]. Due to the low ductility of stirrup steel (category A), when the beams were destroyed, the stirrups broke in many cases, resulting in significant deformation of the element (Figures 2 ÷ 4).

## Conclusions

The research conducted and analysis of the obtained results allowed the formulation of the following conclusions.

1) the fine-aggregate composite without the addition of steel fibres behaves like ordinary concrete in bending elements with conventional reinforcement;

2) at the ultimate limit state, the reinforcement not distributed in the fine-aggregate fibre composite beams contributes significantly to the transfer of shear forces, and the increase in shear capacity is approx. 90% compared to elements without shear reinforcement;

3) in the support zone, steel fibers work better than stirrups due to the more continuous thermal nature of the material. This conclusion confirms the dependence of the transverse force ( $V$ ) on the deformations ( $\varepsilon$ ) determined on the lateral surface of the beams, at its height. The influence of steel fibers and stirrups is summarized in the transfer of transverse forces, both in terms of increasing the load-bearing capacity and in the deformation characteristics of the element;

4) the addition of steel fibres in the amount of 1.2% increases the shear capacity of elements made of fine-aggregate fibre composite, which allows for the reduction of conventional reinforcement of such elements. Due to the high residual tensile strength of fibre concrete, the fine-aggregate fibre composite does not require minimal reinforcement in the form of stirrups, as indicated by the formula:

$$F_{Ftuk} = 2,18 \text{ MPa} > 0,08 \cdot \sqrt{f_{ck}} = 0,6 \text{ MPa}$$

5) taking into account the mechanical and physical properties of the fine-aggregate fibre composite and the test results of the load-bearing capacity presented in the article and the bending capacity of beams made of this fibre composite, discussed in [6, 17], it can be assumed that it will prove useful as a structural material. The developed fine-aggregate fibre composite, which could be an alternative to ordinary concrete in some applications, enables the management of accumulated sand heaps devoid of coarse fractions in the Pomeranian region in Poland, the Middle East or North Africa.

Received: 20.05.2024  
Revised: 03.06.2024  
Published: 23.09.2024 r.

tu propagacji rysy ukośnej, gdzie wg Stratforda [22] strzemiona mogą być najbardziej wyteżone w miejscu, w którym rysa ukośna przebiega bliżej zbrojenia rozciąganego, a najmniej w obszarze, gdzie jest ona ograniczana przez strefę ściskaną. Jednocześnie należy podkreślić, że nie we wszystkich strzemionach dochodziło do uplastycznienia stali, co można tłumaczyć pojawieniem się kolejnej rysy ukośnej, a więc pracą sąsiedniego strzemienia lub zmianą trajektorii istniejącej rysy ukośnej. Uplastycznienie stali strzemion następowało przy różnym poziomie siły poprzecznej, od 76 do 97% siły niszczącej. Podobne rezultaty zaobserwowano w badaniach Breveglieri [23]. Ze względu na niewielką ciągliwość stali strzemion (kategoria A), przy zniszczeniu belek na ścinanie, strzemiona w wielu przypadkach zrywały się w wyniku znacznych odkształceń elementu (rysunki 2 ÷ 4).

## Wnioski

Przeprowadzone badania i analiza uzyskanych wyników pozwoliły na sformułowanie następujących wniosków.

1) drobnokruszywowy kompozyt cementowy bez dodatku włókien stalowych zachowuje się jak beton zwykły w zginanych elementach ze zbrojeniem konwencjonalnym;

2) wg stanu granicznego nośności, zbrojenie rozproszone w belkach z drobnokruszowego fibrokompozytu znacznie przyczynia się do przenoszenia sił ścinających, a przyrost nośności wynosi ok. 90% w porównaniu z elementami bez zbrojenia na ścinanie;

3) w strefie przypodporowej włókna stalowe pracują lepiej niż strzemiona ze względu na bardziej ciągliwy charakter materiału. Wniosek ten potwierdza zależność siły poprzecznej ( $V$ ) od odkształceń ( $\varepsilon$ ), określonych na bocznej powierzchni belek, na jej wysokości. Wpływ włókien stalowych i strzemion sumuje się przy przenoszeniu sił poprzecznych, zarówno w aspekcie zwiększenia nośności, jak również w charakterystyce odkształceniowej elementu;

4) dodatek włókien stalowych w ilości 1,2% zwiększa nośność na ścinanie elementów wykonanych z drobnokruszowego fibrokompozytu, co pozwala na redukcję zbrojenia konwencjonalnego takich elementów. Ze względu na dużą wytrzymałość resztkową fibrobetonu na rozciąganie  $f_{Ftuk}$  opracowany drobnokruszywowy fibrokompozyt nie wymaga zbrojenia minimalnego w postaci strzemion, na co wskazuje zależność:

$$F_{Ftuk} = 2,18 \text{ MPa} > 0,08 \cdot \sqrt{f_{ck}} = 0,6 \text{ MPa}$$

5) biorąc pod uwagę właściwości mechaniczno-fizyczne drobnokruszowego fibrokompozytu oraz wyniki badań nośności na ścinanie przedstawione w artykule i nośności na zginanie belek wykonanych z tego fibrokompozytu, omówione w pracach [6, 17], można przypuszczać, że sprawdzi się on jako materiał konstrukcyjny. Opracowany drobnokruszywowy fibrokompozyt, który byłby w niektórych zastosowaniach alternatywą dla betonu zwykłego, umożliwia zagospodarowanie zalegających hałd piasku pozbawionego frakcji grubych w rejonie Pomorza w Polsce, na Bliskim Wschodzie, czy też w północnej Afryce.

Wpłynął do redakcji: 20.05.2024 r.  
Otrzymano poprawiony po recenzjach: 03.06.2024 r.  
Opublikowano: 23.09.2024 r.

## Literatura

- [1] Yazıcı S, Inan G, Tabak V. Effect of aspect ratio and volume fraction of steel fiber on the mechanical properties of SFRC. *Construction and Building Materials*. 2007; <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2006.05.025>.
- [2] Hu H. Mechanical properties of SFRC using blended manufactured and recycled tyre steel fibres. *Construction and Building Materials*. 2018; <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.12.116>.
- [3] Li C, Zhao M, Zhang X, Li J, Li X, Zhao M. Effect of Steel Fiber Content on Shear Behavior of Reinforced Expanded-Shale Lightweight Concrete Beams with Stirrups. *Materials*. 2021; <https://doi.org/10.3390/ma14051107>.
- [4] Domski J, Zakrzewski M. Deflection of steel fiber reinforced concrete beams based on waste sand. *Materials*. 2020; <https://doi.org/10.3390/ma13020392>.
- [5] Głodkowska W, Kobaka J. Estimating the properties of a fine aggregate fibre reinforced cementitious composite using non-destructive methods. *Journal of Civil Engineering and Management*. 2018; <https://doi.org/10.3846/jcem.2018.6600>.
- [6] Głodkowska W. Waste Sand Fiber Composite: Models of Description of Properties and Application. *Annu. Set The Environ Prot*; 2018.
- [7] Głodkowska W, Laskowska-Bury J, Kobaka J. Drobnokruszowy kompozyt mineralny zbrojony włóknami rozproszonymi. *Politechnika Koszalińska*. 07.10.2021. Pat. 239641
- [8] Batson G, Jenkins E, Spaney R. Steel Fibers as Shear Reinforcement Beams. *ACI J*. 1972, 69, 640 – 644.
- [9] Sharma A, Shear K. Strength of Steel Fiber Reinforced Concrete Beams. *ACI J*. 1986, 83, 624–628.
- [10] Narayanan R, Darwish I Y S. Use of Steel Fibres as Shear Reinforcement. *ACI J*. 1987, 84, 216 – 227.
- [11] You Z, Jalai S, Ding Y. The composite effect of steel fibres and stirrups on shear behaviour of beams using self consolidating concrete. *Engineering Structures*. 2011; <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2010.09.023>.
- [12] Zhao J, Liang J, Chu L, Shen F. Experimental Study on Shear Behavior of Steel Fiber Reinforced Concrete Beams with High-Strength Reinforcement. *Materials*. 2018. <https://doi.org/10.3390/ma11091682>.
- [13] Ding Y, Yulin Z, Ning X, Azevedo C. Shear resistance and cracking behaviour of SFRC beams with and without axial load. *Magazine of Concrete Research*. 2014; <https://doi.org/10.1680/mac.14.00043>.
- [14] Cuenca E, Conforti A, Minelli F, Plizzari G A. A material-performance-based database for FRC and RC elements under shear loading. *Mater. Struct*. 2018; <https://doi.org/10.1617/s11527-017-1130-7>.
- [15] Lantsoght E O L. Database of Shear Experiments on Steel Fiber Reinforced Concrete Beams without Stirrups. *Materials* 2019; <https://doi.org/10.3390/ma12060917>.
- [16] Lehman M. Nośność na ścinanie belek z fibrokompozytu na bazie piasków odpadowych. *Politechnika Koszalińska*. 06.2020.
- [17] Głodkowska W, Ziarkiewicz M. Cracking behavior of Steel Fiber Reinforced Waste Sand Concrete beams in flexure – experimental investigation and theoretical analysis. *Engineering Structures*. 2018; <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.08.097>.
- [18] PN-EN 12620:2004 Kruszywa do betonu.
- [19] Subramaniam K V L, Gali S. Shear behaviour of Steel Fiber Reinforced Concrete using full-field displacement from digital image correlation. *MATEC Web of Conferences*. 2017; <https://doi.org/10.1051/mateconf/201712004003>.
- [20] Lim D H, Oh B H. Experimental and Theoretical Investigation on the Shear of Steel Fibre. *Engineering Structures*. 1999; [https://doi.org/10.1016/S0141-0296\(98\)00049-2](https://doi.org/10.1016/S0141-0296(98)00049-2).
- [21] ASCE-ACI Committee 426. The Shear Strength of Reinforced Concrete Members. *Journal of Structural Division*. 1973; 99, 6.
- [22] Stratford T, Burgoyne C. Shear Analysis of Concrete with Brittle Reinforcement. *Journal of composites for construction*. 2003; [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0268\(2003\)7:4\(323\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0268(2003)7:4(323)).
- [23] Breveglieri M, Aprile A, Barros J A O. Shear strengthening of reinforced concrete beams strengthened using embedded through section steel bars. *Engineering Structures*. 2014; <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2014.09.026>.