

mgr inż. Artur Sanok¹⁾

ORCID: 0000-0001-5651-7007

dr inż. Marek Lehmann¹⁾

ORCID: 0000-0002-1314-3014

dr hab. inż. Jacek Domski^{1)*}

ORCID: 0000-0002-5112-1035

Test of the strength of concrete with the addition of waste fibers

Badanie wytrzymałości betonu z dodatkiem włókien odpadowych

DOI: 10.15199/33.2025.10.26

Abstract. The aim of this article is to determine selected properties of concrete fiber composite containing fibers derived from recycled tires (so-called steel cord). The tests were conducted on five mixtures with varying volumetric additions of fibers (0.50, 0.75, 1.00, 1.25, 1.50%) as well as a control mixture without fibers. Experiments were carried out to verify compressive strength, splitting tensile strength, residual flexural strength, and to determine the proportional limit and secant modulus of elasticity. An increase in the mechanical and deformation properties of the analyzed composites was noted along with an increase in the volumetric proportion of fibers. The compressive strength increased by 1.32% to 13.63%, the secant modulus of elasticity increased by 1.79% to 3.67%, the splitting tensile strength grew by 5.11% to 28.98%, and the proportional limit increased by 3.89% to 20.59%. The results indicate an improvement in the strength properties and a change in the deformation characteristics of the composite with steel cord additive compared to the reference concrete.

Keywords: concrete; steel cord; waste fibers; recycling.

Streszczenie. W artykule przedstawiono wybrane właściwości fibrokompozytu betonowego z włóknami pochodzącymi z recyklingu opon (tzw. kordu stalowego). Badania dotyczyły pięciu mieszanek z dodatkiem włókien o różnej gęstości (0,50, 0,75, 1,00, 1,25, 1,50%) oraz mieszanki kontrolnej bez włókien. Wykonano badania mające na celu weryfikację wytrzymałości na ściskanie, wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu, wytrzymałości resztkowej przy zginaniu i określenie granicy proporcjonalności oraz siecznego modułu sprężystości. Odnotowano poprawę cech wytrzymałościowo-odkształceniowych analizowanych kompozytów wraz ze zwiększeniem udziału objętościowego włókien. Wytrzymałość na ściskanie zwiększyła się o 1,32 – 13,63%, sieczny moduł sprężystości o 1,79 – 3,67%, wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu o 5,11 – 28,98%, a granica proporcjonalności o 3,89 – 20,59%. Wyniki wskazują na poprawę cech wytrzymałościowych oraz zmianę właściwości odkształceniowych kompozytu z dodatkiem kordu stalowego w porównaniu z betonem wzorcowym.

Słowa kluczowe: beton; kord stalowy; włókna odpadowe; recykling.

Currently, as environmental protection becomes increasingly important, finding ways to utilize industrial waste in construction is crucial. One example is the use of steel fibers from used car tires in concrete. Recent years have brought analyses presented in publications [1 – 6], which describe selected strength properties of concretes based on these fibers and discuss possible applications of such composites. The basic property determined by most researchers is the compressive strength of composites with the addition of steel cord [7 – 25]. It has been shown that the addition of steel fibers from car tires to concrete improves this property, but to varying degrees. A significant effect of the steel cord addition on the splitting tensile strength [8 – 10] has also been noted, while its insignificant effect on the modulus of elasticity [7 – 10] and bulk density [8, 11] of the analyzed fiber-reinforced concretes has been observed.

This article presents an analysis of the strength properties of concrete with the addition of waste fibers only. The key element of the research and analysis carried out is the use of steel cord in the concrete mix without the use of any plasticizer or superplasticizer, based on the reference concrete.

Obecnie, kiedy ochrona środowiska staje się coraz bardziej istotna, poszukiwanie sposobów na wykorzystanie odpadów przemysłowych w budownictwie ma kluczowe znaczenie. Jednym z przykładów jest zastosowanie włókien stalowych ze zużytych opon samochodowych w betonie. Ostatnie lata przyniosły analizy przedstawione w publikacjach [1 – 6], w których opisano wybrane cechy wytrzymałościowe betonów na bazie wymienionych włókien oraz omówiono możliwe kierunki zastosowania tego rodzaju kompozytów. Podstawową cechą określaną przez większość badaczy jest wytrzymałość na ściskanie kompozytów z dodatkiem kordu stalowego [7 – 25]. Wykazano, że dodatek włókien stalowych z opon samochodowych do betonu poprawia tę cechę, ale w różnym stopniu. Zdecydowany wpływ dodatku kordu stalowego odnotowano również na wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu [8 – 10] oraz zaobserwowano nieznaczny jego wpływ na moduł sprężystości [7 – 10] i gęstość objętościową [8, 11] analizowanych fibrobetonów.

W artykule zaprezentowano analizę cech wytrzymałościowych betonu z dodatkiem wyłącznie włókien odpadowych. Kluczowe w przeprowadzonych badaniach i analizach jest zastosowanie kordu stalowego w mieszance betonowej bez użycia jakiegokolwiek plastyfikatora lub superplastyfikatora, bazując na betonie wzorcowym.

¹⁾ Politechnika Koszalińska, Wydział Inżynierii Lądowej, Środowiska i Geodezji

^{*)} Correspondence address: jacek.domski@tu.koszalin.pl

Test method

Six types of concrete mixtures were tested in the study – a control without waste fibers and five concrete mixtures with different volumetric fractions of steel cord. Table 1 presents the composition of the concrete mixtures used to prepare the control samples, and Table 2 presents the weight fraction of steel cord in each test series. The names of the individual series refer to the percentage of steel cord in the concrete mixture. The strength parameters of one hundred random waste fibers are presented in Table 3 [21]. Portland cement CEM I 42.5 R, tap water according to the standard [26], and aggregate with a grain size of up to 8 mm were used in the tests presented in this article. The upper limit of the grain size curve was assumed to be 8 mm according to the standard [27], and the water-cement ratio was 0.55.

Table 1. Concrete mix composition [kg/m³]

Tabela 1. Skład mieszanki betonowej [kg/m³]

Ce- ment	Aggregate [mm]Kruszywo [mm]						Water/ Woda	W/C
	0,0 – 0,25	0,25 – 0,5	0,5 – 1,0	1,0 – 2,0	2,0 – 4,0	4,0 – 8,0		
350	184	276	220,8	276,0	368,0	515,2	192,5	0,55

All samples and tests were performed at the Laboratory of Building Materials and Structures of the Koszalin University of Technology. A single series of test elements consisted of six samples manufactured in accordance with standards [28, 29]. Sample preparation and curing were performed according to [30]. Tests were performed after 28 days of sample curing. Each mix was verified for consistency using the VeBe method in accordance with the standard [31]. Consistency determination took place immediately before sample preparation. Subsequently, the bulk density of the concrete was determined using the displaced water volume method, in accordance with the standard [32]. For this purpose, cubic samples with sides of 100 ± 0.5 mm were prepared. After 28 days, they were removed from the saturated water.

Compressive strength tests were performed on cylindrical samples with a diameter of 150 ± 0.75 mm and a height of 300 ± 15 mm. Compressive strength tests were performed in accordance with the standard [33]. A constant stress increase of 0.6 MPa/s was established until sample failure.

The secant modulus of elasticity was tested using method A according to standard [34] and determined on cylindrical samples of 150×300 mm. According to standard [34], appropriate stress levels were assumed, namely 1/3 and 1/9 of the average compressive strength determined on cylindrical samples. The test determined the sample's deformation on two of its measuring lines (forming a cylinder) as a function of stress. The stress change (when loading and unloading the sample) was assumed to be 0.6 MPa/s. After completing the Young's modulus test, a **compressive strength** test was performed on the same samples to verify the obtained results, while splitting **tensile strength tests** were performed on cubic samples with sides of 150 ± 0.75 mm. These samples were placed in a testing machine perpendicular to the direction of concreting. The loading speed was assumed to be 0.05 MPa/s. The tests were carried out in accordance with the standard procedure [35].

Metoda badań

W badaniach przetestowano sześć rodzajów mieszanek betonowych – kontrolną bez włókien odpadowych oraz pięć mieszanek betonowych z różnym udziałem objętościowym kordu stalowego. Tabela 1 przedstawia skład mieszanek betonowych wykorzystywanych do przygotowania próbek kontrolnych, a tabela 2 udział wagowy kordu stalowego w poszczególnych seriach badawczych. Nazwy poszczególnych serii odnoszą się do procentowego udziału kordu stalowego w mieszance betonowej. Parametry wytrzymałościowe stu losowych włókien odpadowych przedstawia tabela 3 [21]. Do badań prezentowanych w artykule wykorzystano cement portlandzki CEM I 42,5 R, wodę wodociągową zgodnie z normą [26] oraz kruszywo o granulacji do 8 mm. Przyjęto górną granicę krzywej uziarnienia do 8 mm wg normy [27] oraz stosunek wodno-cementowy na poziomie 0,55.

Table 2. Weight share of cord per m³ of concrete mix [kg]

Tabela 2. Udział wagowy kordu w m³ mieszanki betonowej [kg]

Steel/cord/Udział kordu stalowego					
0,00%	0,50%	0,75%	1,00%	1,25%	1,5%
0,0	39,25	58,88	78,50	98,13	117,75

Table 3. Steel cord parameters [21]

Tabela 3. Parametry kordu stalowego [21]

Diameter [mm]/ Średnica [mm]	Length [mm]/ Długość [mm]	Tensile strength [MPa]/Wytrzymałość na rozciąganie [MPa]
0,31	13,29	1789

Wszystkie próbki oraz badania wykonano w Laboratorium Materiałów i Konstrukcji Budowlanych Politechniki Koszalińskiej. Pojedyncza seria elementów próbnych składała się z sześciu próbek wykonanych zgodnie z normami [28, 29]. Przygotowanie oraz pielęgnacja próbek odbyła się wg [30]. Badania zrealizowano po 28 dniach dojrzewania próbek. Każdy zarób zweryfikowano pod względem konsystencji metodą VeBe zgodnie z normą [31]. Oznaczenie konsystencji miało miejsce bezpośrednio przed wykonaniem próbek. Następnie oznaczono gęstość objętościową betonu metodą objętości wypartej wody, zgodnie z normą [32]. Do tego celu wykonano próbki sześciennie o boku 100 ± 0.5 mm. Po 28 dniach wyjęto je z wody w stanie nasycenia.

Badanie wytrzymałości na ściskanie wykonano na próbkach walcowych o średnicy 150 ± 0.75 mm oraz wysokości 300 ± 15 mm. Testy wytrzymałości na ściskanie wykonano zgodnie z normą [33]. Ustalono stały przyrost naprężeń 0,6 MPa/s, aż do zniszczenia próbek.

Badanie siecznego modułu sprężystości wykonano metodą A wg normy [34] i oznaczono go na próbkach cylindrycznych 150×300 mm. Zgodnie z normą [34] przyjęto odpowiednie poziomy naprężenie, a mianowicie 1/3 i 1/9 średniej wytrzymałości na ściskanie określonej na próbkach walcowych. W badaniu określano odkształcenie próbki na dwóch jej liniach pomiarowych (tworzących walca) w funkcji naprężenia. Przyjęto zmianę naprężeń (przy obciążaniu i odciążaniu próbki) o wartości 0,6 MPa/s. Po zakończeniu badania modułu Younga przeprowadzono w tych samych próbkach **test wytrzymałości na ściskanie** w celu weryfikacji uzyskanych wyników, natomiast **testy wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu** wykonano na próbkach sześciennych o boku 150 ± 0.75 mm. Próbki te umieszczano w maszynie wytrzymałościowej prostopadle do kierunku betonowania. Przyjęto prędkość obciążenia na poziomie 0,05 MPa/s. Badania przeprowadzono zgodnie z procedurą normy [35].

The residual bending strength test was performed on beams with dimensions of $150 \times 150 \times 600$ mm. A notch 25 ± 1 mm deep and 3 ± 0.5 mm wide was made in the middle of the beam span to force a crack to appear in the measurement area. The test was performed by increasing the crack opening by 0.05 mm/min until the crack width was 0.1 mm. After exceeding this value, the speed was increased to 0.2 mm/min. The test was continued until the crack opening was 4 mm [29].

Test results

Based on the consistency test results, there was no change in the consistency class of the mixtures with fibers added up to 1.25% compared to the control mixture of 0.00%. Only the addition of fibers at a level of 1.50% by volume changed the consistency class of the mixture to V2. The consistency test results are presented in Table 4.

Concrete mixtures with steel cord additions exhibit higher bulk density and lower standard deviation compared to the control mixture. Bulk density increases by an average of 0.015 g/cm^3 with increasing fiber addition. The highest bulk density was observed in the mixture with 1.50% fiber content by volume, representing a 3.6% increase. The bulk density results are presented in Figure 1.

The compressive strength results are presented in Figure 2. All series with the addition of steel cord achieved higher compressive strength than the control mixture, with the series containing 1.50% fiber volume having the highest increase (an increase of 13.63% compared to the 0.00% series). Furthermore, a similar increase in compressive strength was observed with increasing the percentage of steel cord in the range of 0.75 – 1.50%.

Figure 3 presents the results of the stabilized modulus of elasticity test for all the concretes analyzed. Fiber content had a small effect on the modulus value. The difference between

Badanie wytrzymałości resztkowej przy zginaniu wykonano na belkach o wymiarach $150 \times 150 \times 600$ mm. W środku rozpiętości belki wykonano nacięcie o głębokości 25 ± 1 mm i szerokości 3 ± 0.5 mm w celu wymuszenia wystąpienia rysy w obszarze pomiarowym. Badanie realizowano przez przyrost rozwarcia rysy wynoszący 0,05 mm/min do wartości szerokości rysy równej 0,1 mm. Po przekroczeniu tej wartości zwiększano prędkość do 0,2 mm/min. Badanie prowadzono do rozwarcia rysy 4 mm [29].

Wyniki badań

Na podstawie wyników badania konsystencji stwierdzono brak zmiany klasy konsystencji mieszanek z dodatkiem włókien do 1,25% w porównaniu z mieszanką kontrolną 0,00%. Dopiero dodatek włókien na poziomie 1,50% objętości zmienia klasę konsystencji mieszanki na V2. Wyniki pomiarów konsystencji przedstawia tabela 4.

Mieszanki betonowe z dodatkiem kordu stalowego cechują się większą gęstością objętościową oraz mniejszym odchyleniem standardowym w porównaniu z mieszanką kontrolną. Wraz ze zwiększeniem dodatku włókien zwiększa się gęstość objętościowa średnio o $0,015 \text{ g/cm}^3$. Największą gęstością objętościową cechuje się mieszanka z zawartością włókien 1,50% objętości. Jest to wzrost o 3,6%. Wyniki gęstości objętościowej przedstawiono na rysunku 1.

Wyniki wytrzymałości na ściskanie przedstawiono na rysunku 2. Wszystkie serie z dodatkiem kordu stalowego uzyskały większą wytrzymałość na ściskanie od mieszanki kontrolnej, a największą serią zawierającą 1,50% objętości włókien (wzrost w porównaniu z serią 0,00% wyniósł 13,63%). Ponadto stwierdzono podobny przyrost wytrzymałości na ściskanie wraz ze zwiększeniem procentowej zawartości kordu stalowego w przedziale 0,75 – 1,50%.

Na rysunku 3 przedstawiono wyniki badania ustabilizowanego modułu sprężystości wszystkich analizowanych betonów. Stwierdzono niewielki wpływ zawartości włókien na war-

Table 4. Concrete Mix Consistency Results VeBe Method

Tabela 4. Wyniki badania konsystencji mieszanki betonowej metodą VeBe

Consistency of the concrete mix/Konsystencja mieszanki betonowej	Fiber content [%]/Zawartość włókien [%]					
	0,00	0,50	0,75	1,00	1,25	1,50
Average value [s]/Wartość średnia [s]	8,27	8,97	9,08	9,86	8,55	12,86
Standard deviation [s]/Odchylenie standardowe [s]	0,25	1,22	0,25	1,70	0,42	3,06
Consistency class/Klasa konsystencji	V3	V3	V3	V3	V3	V2

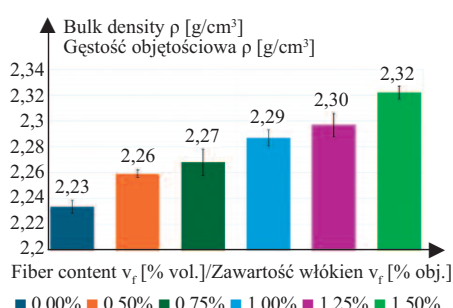


Fig. 1. Bulk density results of fiber concrete
Rys. 1. Gęstość objętościowa fibrobetonów

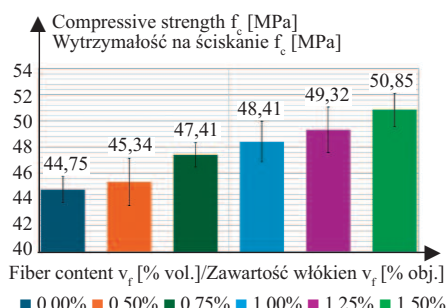


Fig. 2. Compressive strength results of fiber concrete
Rys. 2. Wytrzymałość na ściskanie fibrobetonu

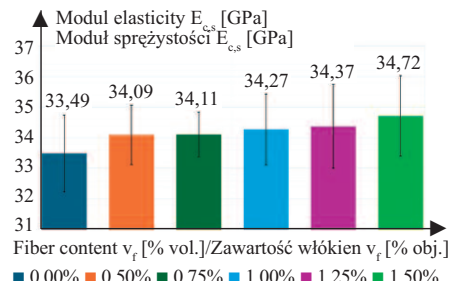


Fig. 3. Results of the stabilized secant modulus of elasticity of fiber concrete

Rys. 3. Ustabilizowany sieczny moduł sprężystości fibrobetonu

the extreme series was 1.23 GPa. This increase is within the obtained standard deviation and can therefore be considered insignificant.

Figure 4 shows the splitting tensile strength results. The strength value increased with increasing waste fiber volume fraction from 5.11% to 29.98% compared to the 0.00% series.

The results of the residual tensile strength test in bending are presented in Table 5. The proportionality limit increased with increasing fiber waste. The series of samples containing 1.50% fiber by volume showed a 21% increase in strength compared to the series containing 0.00%. In each of the four fiber composite variants, after reaching the proportionality limit, a sudden decrease in loading force was observed, resulting from the appearance of a bending crack. The amount of dispersed reinforcement had a key impact on the magnitude of the force decrease. This decrease was greatest for the 0.50% variant (64%), and smallest for the 1.50% variant (17%). Thanks to the addition of steel cord to the mixture, the analyzed composites achieved residual flexural strength, and the force level after the crack appeared determined this strength. The highest residual strength was observed for the 1.50% cord variant, due to the smallest force decrease. After crack formation, the loading force decreased approximately uniformly in each of the analyzed fiber-containing components. Analyzing the slope of the force-CMOD curve revealed that for the mixture variants with reinforcement ranging from 0.75% to 1.50%, the slopes of the curves were similar. This may indicate a similar pattern of tensile stress transfer during bending with increasing crack width, and the value of these stresses depends primarily on the amount of cord in the mixture.

Analyzing the results in Table 5, it was found that the standard deviations of the residual strengths, as well as the proportionality limit, for all composites are small (values given in parentheses). This fact is unusual for this test method, although beneficial. The literature on the subject contains

tość modułu. Różnica pomiędzy skrajnymi seriami wyniosła 1,23 GPa. Wzrost ten mieści się w uzyskanym odchyleniu standardowym, dlatego też można go uznać za nieistotny.

Rysunek 4 przedstawia wyniki wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu. Wartość wytrzymałości zwiększyła się wraz z wzrostem udziału objętościowego włókien odpadowych od 5,11% do 29,98% w porównaniu z serią 0,00%.

Wyniki badania resztkowej wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu przedstawiono w tabeli 5. Stwierdzono zwiększenie granicy

proporcjonalności wraz z wzrostem ilości włókien odpadowych. Seria próbek zawierających 1,50% obj. włókien wykazała zwiększenie wytrzymałości o 21% w porównaniu z serią 0,00%. W każdym z czterech wariantów kompozytów z włóknami, po osiągnięciu granicy proporcjonalności, obserwuje się skokowy spadek siły obciążającej będący skutkiem pojawienia się rysy od zginania. Ilość zbrojenia rozproszonego miała kluczowy wpływ na wielkość spadku siły. Był on największy w przypadku wariantu 0,50% i wynosił 64%, a najmniejszy równy 17% w przypadku wariantu 1,50%. Dzięki dodatkowi kordu stalowego do mieszanki, analizowane kompozyty uzyskały wytrzymałość resztkową przy zginaniu, a poziom sił po pojawieniu się rysy determinował tę wytrzymałość. Największą wytrzymałość resztkową stwierdzono w przypadku wariantu 1,50% kordu, ze względu na najmniejszy spadek siły. Po pojawieniu się rysy, w każdym z analizowanych komponentów z włóknami, siła obciążająca zmniejszała się w sposób jednostajny (w przybliżeniu). Analizując nachylenie krzywej siła – CMOD, stwierdzono, że w przypadku wariantów mieszanki ze zbrojeniem w ilości od 0,75% do 1,50% nachylenie krzywych jest do siebie zbliżone. Może to świadczyć o podobnym sposobie przenoszenia naprężeń rozciągających przy zginaniu wraz ze wzrostem szerokości rysy, a wartość tych naprężeń zależy przede wszystkim od ilości kordu w mieszance.

Analizując wyniki z tabeli 5, stwierdzono, że odchylenia standardowe wytrzymałości resztkowych, jak również granicy proporcjonalności wszystkich kompozytów, są niewielkie (wartości podane w nawiasach). Fakt ten nie jest typowy w przypadku tej metody badania, choć korzystny. W literaturze przed-

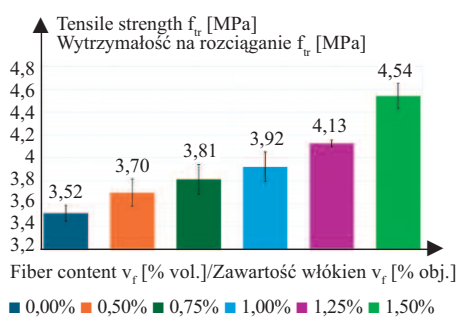


Fig. 4. Splitting tensile strength results

Rys. 4. Wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu

Table 5. Average values of the proportionality limit and residual tensile strength in bending

Tabela 5. Wartości średnie granicy proporcjonalności i resztkowej wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu

Type of composite/ Rodzaj kompozytu (zawartość włókna %)	The limit of proportionality MPa/Granica proporcjonalności [MPa] $f_{ct,L}^f$	Residual tensile strength when flexed [MPa]/Resztkowa wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu [MPa]				$f_{R,3}/f_{R,1}$	$f_{R,1}/f_{ct,L}^f$	Class by Model code/Klasa wg Model code
		$f_{R,1}$	$f_{R,2}$	$f_{R,3}$	$f_{R,4}$			
0,00%	4,37 (0,07)	—	—	—	—	—	—	—
0,50%	4,54 (0,15)	1,61 (0,08)	1,19 (0,10)	0,89 (0,10)	0,69 (0,10)	0,56	0,35	1,5a
0,75%	4,74 (0,22)	2,43 (0,36)	1,82 (0,22)	1,37 (0,14)	1,05 (0,11)	0,56	0,51	2,0a
1,00%	4,91 (0,20)	2,70 (0,20)	2,11 (0,20)	1,63 (0,15)	1,22 (0,11)	0,60	0,55	2,5a
1,25%	5,03 (0,12)	3,31 (0,30)	2,55 (0,30)	1,89 (0,28)	1,43 (0,24)	0,57	0,66	3,0a
1,50%	5,27 (0,16)	4,03 (0,29)	3,32 (0,22)	2,50 (0,16)	1,96 (0,20)	0,62	0,76	4,0a

studies of residual strengths with higher standard deviations [37 – 39]. This allows us to conclude that tests of structural elements made from the described mixtures will be burdened with smaller scatter of the results of load-bearing capacity and crack width. Figure 5 shows representative test results from individual series for determining the tensile strength in bending.

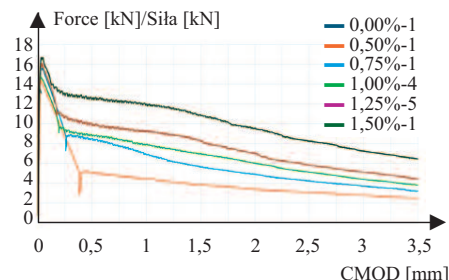


Fig. 5. Force – crack width relationship (CMOD) during bending tensile strength testing
Rys. 5. Zależność siła – szerokość rozwarcia rysy CMOD podczas badania wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu

Analysis of results

The main physical and mechanical properties of concrete are presented in Eurocode 2 [40] as analytical relations as a function of compressive strength f_c , therefore it was decided to determine similar relations for the analyzed material. Due to the fact that the fiber content in the matrix has a significant effect on compressive strength, the remaining mechanical properties are determined as a function of f_c , similarly to Eurocode 2 (EC-2) [40]. Figure 6 presents the relationship between compressive strength and tensile splitting strength. By comparing the relationships between these two properties, the brittleness index of the tested composite can be determined, which is the ratio of tensile strength to compressive strength. For better interpretation, a standard curve describing the relationship between tensile splitting strength and compressive strength is also plotted on the graph. It should be emphasized that, according to Fib Model Code 2010 [36], the standard formula for axial tensile strength can also be used to determine tensile splitting strength without major modifications. Figure 6 shows that for the strength of samples with low fiber content (0.50% – 0.75%), the brittleness index is lower than for ordinary concrete. This is likely due to the lack of coarser aggregate fractions that bridge cracks at an early stage of their formation. A steel cord content of approximately 1.0% allows the material to achieve a brittleness index similar to that of ordinary concrete (according to [40]). However, with a fiber content of 1.5% in the matrix, a significantly higher brittleness index was observed compared to the standard value. This is clearly a result of the high tensile strength provided by the fibers. Thus, the intersecting two curves clearly demonstrate the effect of fibers on the material's brittleness index.

Figure 7 presents the relationship between the stabilized modulus of elasticity and compressive strength. As in the previous analysis, a standard curve consistent with EC-2 [40] was plotted on the graph. In this case, an almost linear increase in the modulus of elasticity was observed with increasing compressive

Analiza wyników

Główne właściwości fizykomechaniczne betonu zostały przedstawione w Eurokodzie 2 [40] jako zależności analityczne w funkcji wytrzymałości na ściskanie f_c , dlatego też postanowiono określić podobne zależności w przypadku analizowanego materiału. Ze względu na fakt, że zawartość włókien w matrycy ma wyraźny wpływ na wytrzymałość na ściskanie, pozostałe właściwości mechaniczne wyznaczane są w funkcji f_c , podobnie jak ma to miejsce w Eurokodzie 2 (EC-2) [40]. Na rysunku 6 przedstawiono zależność pomiędzy wytrzymałością na ściskanie a wytrzymałością na rozciąganie przy rozłupywaniu. Porównując relacje tych dwóch cech, można określić wskaźnik kruchości badanego kompozytu, będący stosunkiem wytrzymałości na rozciąganie do wytrzymałości na ściskanie. W celu lepszej interpretacji naniesiono na wykres również normową krzywą opisującą relację wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu i wytrzymałości na ściskanie. Należy podkreślić, że zgodnie z Fib Model Code 2010 [36], normowy wzór na wytrzymałość na osiowe rozciąganie można bez większych

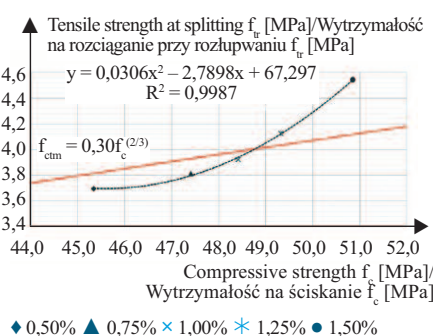


Fig. 6. Relationship between compressive strength f_c and tensile strength at splitting f_{tr}
Rys. 6. Zależność pomiędzy wytrzymałością na ściskanie f_c a wytrzymałością na rozciąganie przy rozłupywaniu f_{tr}

modyfikacji stosować również do wyznaczania wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu. Z rysunku 6 wynika, że w przypadku wytrzymałości próbek o małej zawartości włókien (0,50% – 0,75%), wskaźnik kruchości jest mniejszy niż betonu zwykłego. Wynika to prawdopodobnie z braku grubszych frakcji kruszywa, które mostkują rysy na wczesnym etapie ich powstawania. Zawartość kordu stalowego ok. 1,0% pozwala osiągnąć wskaźnik kruchości materiału jak w przypadku betonu zwykłego (wg [40]). Z kolei przy zawartości 1,5% włókien w matrycy zaobserwowano znacznie większą wartość wskaźnika kruchości w porównaniu z wartością normową. Taki stan rzeczy jest ewidentnie wynikiem dużej wytrzymałości na rozciąganie zapewnionej przez włókna. Tym samym, przecinające się dwie krzywe bardzo wyraźnie pokazują wpływ włókien na wskaźnik kruchości materiału.

Na rysunku 7 przedstawiono zależność ustabilizowanego modułu sprężystości od wytrzymałości na ściskanie. Podobnie jak we wcześniejszej analizie na wykres naniesiono krzywą normową zgodną z EC-2 [40]. W tym przypadku zaobserwowano pra-

ve strength, and thus with increasing steel cord content. At the same time, the increase in modulus of elasticity with increasing compressive strength is very similar to the standard interpretation [40], as confirmed by the similar slopes of both curves in the graph. Despite these similarities, the described material is characterized by an average modulus that is 1 GPa lower than the standard for the corresponding compressive strength. The lower value of the modulus of elasticity obtained in the tests compared to that given in EC-2 is probably due to a different crumb stack.

Figure 8 shows a near-linear relationship between the proportionality limit and the compressive strength of the tested material, while Figure 9 shows the relationship between residual strength and compressive strength. In both cases, the analyzed property increased with increasing compressive strength, which in this case is closely related to the number of fibers in the matrix. It should be noted that the slopes of the curves are similar, but the strengths f_{R1} and f_{R2} showed a greater increase with increasing compressive strength than the strength f_{R4} .

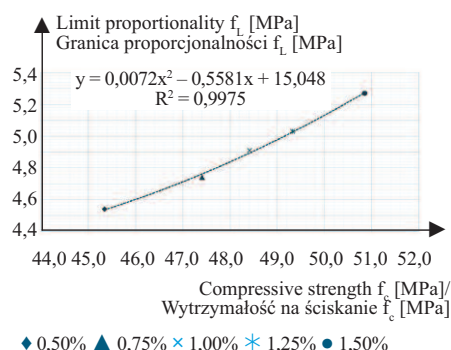


Fig. 8. Relationship between compressive strength f_c and proportionality limit f_L

Rys. 8. Zależność pomiędzy wytrzymałością na ściskanie f_c a granicą proporcjonalności f_L

Conclusions

1. The addition of steel cord changes the tensile properties of the cement composite, providing it with properties that ensure residual strength.
2. The addition of fibers up to 1.25% has no significant effect on the consistency of concrete mixes.
3. The steel cord has a minor effect on increasing the bulk density of concrete elements. Changes ranging from 0.89% to 3.57% were observed compared to the reference concrete.
4. The used waste fibers from car tires strengthen the concrete element under compression. The largest increase was

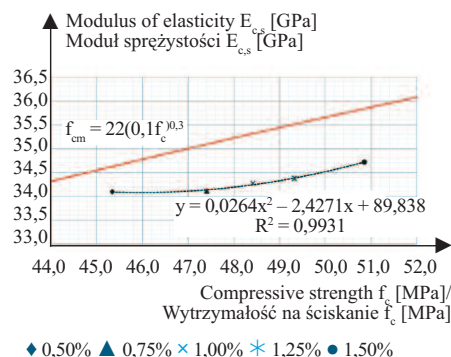


Fig. 7. Relationship between compressive strength f_c and stabilized modulus of elasticity E_{cs}

Rys. 7. Zależność pomiędzy wytrzymałością na ściskanie f_c a ustabilizowanym modulem sprężystości E_{cs}

wie liniowe zwiększenie modułu sprężystości wraz ze wzrostem wytrzymałości na ściskanie, a tym samym wraz ze wzrostem zawartości kordu stalowego. Jednocześnie przyrost modułu sprężystości do przyrostu wytrzymałości na ściskanie jest bardzo podobny, jak w przypadku interpretacji normowej [40], co potwierdzają zbliżone nachylenia obu krzywych na wykresie. Pomimo tych zgodności opisywany materiał charakteryzuje się średnio modulem o 1 GPa mniejszym w porównaniu z normowym w przypadku odpowiadającej wytrzymałości na ściskanie. Uzyskana w badaniach mniejsza wartość modułu sprężystości w porównaniu z podaną w EC2 spowodowana jest prawdopodobnie odmiennym stosem okruszowym.

Na rysunku 8 przedstawiono zbliżoną do liniowej relację wzrostu granicy proporcjonalności w funkcji wytrzymałości na ściskanie badanego materiału, a na rysunku 9 zależność pomiędzy wytrzymałością resztkową i wytrzymałością na ściskanie. W obu przypadkach zaobserwowano zwiększenie analizowanej cechy wraz ze wzrostem wytrzymałości na ściskanie, co w tym przypadku jest ściśle związane z ilością włókien w matrycy. Należy zaznaczyć, że nachylenie krzywych jest do siebie zbliżone, ale wytrzymałość f_{R1} oraz f_{R2} wykazywała się większym przyrostem wartości wraz ze wzrostem wytrzymałości na ściskanie, niż wytrzymałość f_{R4} .

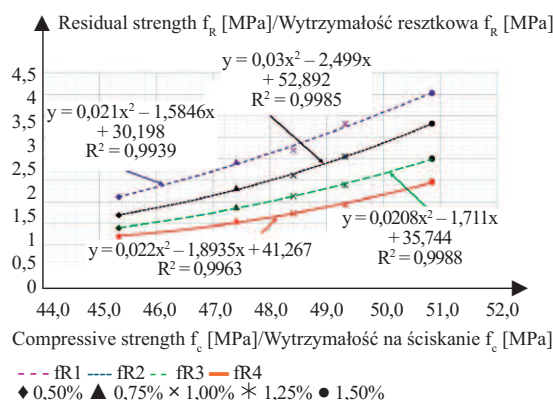


Fig. 9. Relationship between compressive strength f_c and residual strength f_R

Rys. 9. Zależność pomiędzy wytrzymałością na ściskanie f_c a wytrzymałością resztkową f_R

Wnioski

1. Dodatek kordu stalowego zmienia właściwości kompozytu cementowego przy rozciąganiu, nadając mu cechy zapewniające wytrzymałość resztkową.
2. Dodatek włókien do 1,25% nie ma istotnego wpływu na konsystencję mieszanek betonowych.
3. Kord stalowy w niewielkim stopniu wpływa na zwiększenie gęstości objętościowej elementów betonowych. Zaobserwowano zmiany od 0,89% do 3,57% w porównaniu z betonem wzorcowym.
4. Zastosowane włókna odpadowe z opon samochodowych wzmacniają element betonowy poddany ściskaniu. Najwięk-

observed for the concrete containing 1.50% fibers, amounting to 13.63% compared to the reference concrete.

5. The steel fiber content has a minor effect on the stabilized secant modulus of elasticity of concrete elements. The difference compared to the reference concrete did not exceed 4%.

6. The splitting tensile strength increased with fiber addition from 5.11% to 28.98%.

7. Concretes with steel cord exhibited higher values of the proportional limit and were characterized by higher residual flexural strength. The highest values were observed in the series containing 1.50% by volume of fibers.

8. The composite containing 1.50% by volume of steel cord was the only one that did not exhibit a stress drop below the residual strength after matrix cracking.

9. The composite with 0.75% by volume or greater of fibers met all the FIB Model Code guidelines regarding the possibility of partially replacing conventional reinforcement with dispersed reinforcement at the ultimate limit state.

10. The obtained correlation curves, which allow for the determination of splitting strength, modulus of elasticity, proportional limit, and residual strengths as a function of compressive strength, well describe the effect of the addition of waste fibers in concrete.

szy wzrost zanotowano w przypadku betonu zawierającego 1,50% włókien i wyniósł on 13,63% w porównaniu z betonem wzorcowym.

5. Zawartość włókien stalowych ma niewielki wpływ na ustalizowany sieczny moduł sprężystości elementów betonowych. Różnica w porównaniu z betonem wzorcowym nie przekroczyła 4%.

6. Wartość wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu zwiększyła się wraz z dodatkiem włókien od 5,11% do 28,98%.

7. Betony z kordem stalowym wykazywały większe wartości granicy proporcjonalności oraz charakteryzowały się resztkową wytrzymałością na zginanie. Największymi wartościami cechuje się seria z zawartością 1,50% obj. ilości włókien.

8. Kompozyt zawierający 1,50% objętości kordu stalowego był jedynym, który nie wykazał spadku naprężeń po zarysowaniu matrycy poniżej poziomu wytrzymałości resztkowych.

9. Kompozyt z udziałem włókien 0,75% objętości oraz większym spełnił wszystkie wytyczne Fib Model Code dotyczące możliwości częściowego zastąpienia zbrojenia konwencjonalnego zbrojeniem rozproszonym w stanie granicznym nośności.

10. Uzyskane krzywe korelacyjne, umożliwiające określenie wytrzymałości na rozłupywanie, modułu sprężystości, granicy proporcjonalności oraz wytrzymałości resztkowych w zależności od wytrzymałości na ściskanie, dobrze opisują działanie dodatku włókien odpadowych w betonie.

Received: 09.06.2025

Revised: 31.07.2025

Published: 23.10.2025

Artykuł wpłynął do redakcji: 09.06.2025 r.

Otrzymał poprawiony po recenzjach: 31.07.2025 r.

Opublikowano: 23.10.2025 r.

Literature

- [1] Liew KM, Akbar A. The recent progress of recycled steel fiber reinforced concrete. *Constr Build Mater.* 2020. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.117232.
- [2] Abdolpour H, Niewiadomski P, Sadowski Ł. Recycling of steel fibres and spent equilibrium catalyst in ultra-high performance concrete: Literature review, research gaps, and future development. *Constr Build Mater.* 2021. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2021.125147.
- [3] Awolusi TF, Oke OL, Atoyebi OD, Akinkulore OO, Sojobi AO. Waste tires steel fiber in concrete: a review. *Innovative Infrastructure Solutions.* 2021. DOI: 10.1007/s41062-020-00393-w.
- [4] Zia A, Pu Z, Holly I, Umar T, Tariq MAUR, Sufian M. A Comprehensive Review of Incorporating Steel Fibers of Waste Tires in Cement Composites and Its Applications, *Materials.* 2022. DOI: 10.3390/ma15217420.
- [5] Zhang P, Wang C, Wu C, Guo Y, Li Y, Guo J. A review on the properties of concrete reinforced with recycled steel fiber from waste tires. *Reviews on advanced materials science.* 2022. DOI: 10.1515/rams-2022-0029.
- [6] Moasas AM, Amin MN, Khan K, Ahmad W, Al-Hashem MNA, Deifalla AF, Ahmad A. A worldwide development in the accumulation of waste tires and its utilization in concrete as a sustainable construction material: A review, *Case Studies in Construction Materials.* 2022. DOI: 10.1016/j.cscm.2022.e01677.
- [7] Neocleous K, Tlemat H, Pilakoutas K. Design Issues for Concrete Reinforced with Steel Fibers, Including Fibers Recovered from Used Tires, *Journal of Materials in Civil Engineering.* 2006. DOI: 10.1061/(ASCE)0899-1561(2006)18:5(677).
- [8] Samarakoon SMSMK, Ruben P, Wie Pedersen J, Evangelista L. Mechanical performance of concrete made of steel fibers from tire waste. *Case Studies in Construction Materials.* 2019. DOI: 10.1016/j.cscm.2019.e00259.
- [9] Leone M, Centonze G, Colonna D, Micelli F, Aiello MA. Fiber-reinforced concrete with low content of recycled steel fiber: Shear behaviour, *Constr Build Mater.* 2018. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.11.101.
- [10] Fauzan F, Experimental study on the effect of steel fiber waste tyre on high strength concrete, *International Journal of GEOMATE.* 2019. DOI: 10.21660/2019.58.4772.
- [11] Revuelta D, Carballosa P, Garcia Calvo JL, Pedrosa F. Residual Strength and Drying Behavior of Concrete Reinforced with Recycled Steel Fiber from Tires, *Materials.* 2021. DOI: 10.3390/ma14206111.
- [12] Tlemat H, Pilakoutas K, Neocleous K. Stress-strain characteristic of SFRC using recycled fibres, *Materials and Structures/Materiaux et Constructions.* 2006. DOI: 10.1617/s11527-005-9009-4.
- [13] Aiello MA, Leuzzi F, Centonze G, Maffezzoli A. Use of steel fibres recovered from waste tyres as reinforcement in concrete: Pull-out behaviour, compressive and flexural strength. *Waste Management.* 2009. DOI: 10.1016/j.wasman.2008.12.002.
- [14] Centonze G, Leone M, Aiello MA. Steel fibers from waste tires as reinforcement in concrete: A mechanical characterization. *Constr Build Mater.* 2012. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2012.04.088.
- [15] Martinelli E, Caggiano A, Xargay H. An experimental study on the post-cracking behaviour of Hybrid Industrial/Recycled Steel Fibre-Reinforced Concrete, *Constr Build Mater.* 2015. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2015.07.007.
- [16] Pająk M, Application of Fibers from End-of-Life Tires as a Self-Compacting Concrete Reinforcement – An Experimental Study, *Architecture, Civil Engineering, Environment.* 2018. DOI: 10.21307/acee-2018-011.
- [17] Hu H, Papastergiou P, Angelakopoulos H, Guadagnini M, Pilakoutas K. Mechanical properties of SFRC using blended manufactured and recycled tyre steel fibres, *Constr Build Mater.* 2018. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.12.116.

- [18] Hu H, Papastergiou P, Angelakopoulos H, Guadagnini M, Pilakoutas K. Mechanical properties of SFRC using blended Recycled Tyre Steel Cords (RTSC) and Recycled Tyre Steel Fibres (RTSF). *Constr Build Mater*. 2018. DOI: 10.1016/j.conbuildmat. 2018.07.206.
- [19] Pająk M. Badania betonu zbrojonego włóknami ze zużytych opon samochodowych. *Inżynieria i Budownictwo*. 2018; vol. 5: 267 – 270.
- [20] Pająk M. Concrete reinforced with various amounts of steel fibers reclaimed from end-of-life tires, *MATEC Web of Conferences*. 2019. DOI: 10.1051/mateconf/201926206008.
- [21] Pająk M, Krystek M, Zakrzewski M, Domski J. Laboratory Investigation and Numerical Modelling of Concrete Reinforced with Recycled Steel Fibers, *Materials*. 2021. DOI: 10.3390/ma14081828.
- [22] Pająk M, Wandzik G. Laboratory Tests of Concrete Beams Reinforced with Recycled Steel Fibres and Steel Bars, *Materials*. 2021. DOI: 10.3390/ma14226752.
- [23] Pawelska-Mazur M, Kaszynska M. Mechanical Performance and Environmental Assessment of Sustainable Concrete Reinforced with Recycled End-of-Life Tyre Fibres, *Materials*. 2021. DOI: 10.3390/ma14020256.
- [24] Fantilli AP, Orfeo B, Pérez Caldentey A. The deflection of reinforced concrete beams containing recycled steel fibers. *Structural Concrete*. 2021. DOI: 10.1002/suco. 202000729.
- [25] Zeybek Ö, Özkılıç YO, ÇelikAİ, Deifalla AF, Ahmad M, Sabri Sabri MM. Performance evaluation of fiber-reinforced concrete produced with steel fibers extracted from waste tire. *Front Mater*. 2022. DOI: 10.3389/fmats.2022.1057128.
- [26] EN 1008:2002, Mixing water for concrete. Specification for sampling, testing and assessing the suitability of water, including water recovered from processes in the concrete industry, as mixing water for concrete.
- [27] PN-EN 1766:2001 Wyroby i systemy do ochrony i napraw konstrukcji betonowych. Metody badań – Betony wzorcowe do badań.
- [28] PN-EN 12390-1:2021 Badania betonu – Część 1: Kształt, wymiary i inne wymagania dotyczące próbek i form.
- [29] PN-EN 14651+A1:2007 Metoda badania betonu zbrojonego włóknem stalowym – Pomiary wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu (granica proporcjonalności LOP).
- [30] PN-EN 12390-2:2019 Badania betonu – Część 2: Wykonywanie i pielęgnacja próbek do badań wytrzymałościowych.
- [31] PN-EN 12350-3:2019 Badania mieszanek betonowej – Część 3: Badanie konsystencji metodą Vebe.
- [32] PN-EN 12390-7:2019 Badania betonu – Część 7: Gęstość betonu.
- [33] PN-EN 12390-3:2019 Badania betonu – Część 3: Wytrzymałość na ściskanie próbek do badań.
- [34] PN-EN 12390-13:2021 Badania betonu – Część 13: Wyznaczanie siecznego modułu sprężystości przy ściskaniu.
- [35] PN-EN 12390-6:2011 Badania betonu – Część 6: Wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu próbek do badań.
- [36] FIB Model Code 2010: Comité euro-international du béton – Fédération internationale de la précontrainte.
- [37] Kelpša Š, Augonis M, Daukšys M, Augonis A. Analysis of Crack Width Calculation of Steel Fibre and Ordinary Reinforced Concrete Flexural Members. *Journal of Sustainable Architecture and Civil Engineering*. 2014. DOI: 10.5755/j01.sace.6.1.6336.
- [38] Gouveia ND, Fernandes NAG, Faria DMV, Ramos AMP, Lúcio VJG. SFRC flat slabs punching behaviour – Experimental research. *Compos B Eng*. 2014. DOI: 10.1016/j.compositesb.2014.04.005.
- [39] Parmentier B, Vandewalle L, Leuven KU. Evaluation of the scatter of the post peak behaviour of fibre reinforced concrete in bending: A step toward reliability, *Proceedings of 7th International RILEM Symposium on Fibre Reinforced Concrete: Design and Applications*. 2008; pp. 133–143.
- [40] PN-EN 1992-1-1:2008 Eurokod 2 – Projektowanie konstrukcji z betonu – Część 1-1: Reguły ogólne i reguły dla budynków.