

M.Sc. Eng. Rafał Kostro^{1*)}

Dr.Sc. Eng. Marta Kosior-Kazberuk, Prof. at PB²⁾

ORCID: 0000-0001-8171-2242

Dr.Sc. Eng. Julita Krassowska²⁾

ORCID: 0000-0001-9209-1285

Dr.Sc. Eng. Kostiantyn Protchenko³⁾

ORCID: 0000-0003-1357-2174

M.Sc. Eng. Abel Belay¹⁾

Selected mechanical properties of basalt microbars reinforced concrete

Wybrane właściwości mechaniczne betonu z mikroprętami bazaltowymi

DOI: 10.15199/33.2024.07.02

Abstract. Basalt microbars are relatively new kind of dispersed reinforcement for concrete members. The results of compressive strength tests, tensile strength tests, modulus of elasticity tests and parameters of fracture mechanics tests for concrete with, 1.5, 2.5, 3.5 kg/m³ minibars in volume of concrete and reference concrete are presented in the paper. Results shows that addition of microbars improves strength properties of concrete and increases mechanical properties of concrete.

Keywords: concrete; basalt microbars; strength properties; fracture mechanic.

Streszczenie. Nowym materiałem stosowanym jako zbrojenie rozproszone w elementach z betonu są mikropręty bazaltowe. W artykule opisano wyniki badań wytrzymałości na ściskanie, wytrzymałości na rozciąganie oraz modułu sprężystości podłużnej, a także określono wartości parametrów mechaniki pękania betonów zawierających 1,5, 2,5, 3,5 kg/m³ mikroprętów oraz betonu referencyjnego. Stwierdzono, że obecność mikroprętów poprawia właściwości mechaniczne betonu i wpływa na parametry mechaniki pękania.

Słowa kluczowe: beton; mikropręty bazaltowe; właściwości wytrzymałościowe; mechanika pękania.

Microbars are a new product used as dispersed reinforcement. They have a similar length to fibers, but unlike fibers, they have spatial stiffness, which allows microbars of different shapes to be produced. A distinction is made between straight, corrugated and hook-ended microbars, among others. Like fibers, they can be made from a variety of materials, such as steel, glass, polymers, or basalt. Microbars are resistant to corrosion, unlike reinforcing steel.

In order to assess the feasibility and benefits of using basalt microbars as dispersed reinforcement in concrete elements, a study of the mechanical properties as well as the fracture mechanics parameters of concrete with these microbars was carried out. Straight microbars with a length of 50 mm and a diameter of 1 mm (Photo 1) were used for the study. Researchers are undertaking numerous studies on the mechanical properties of concrete with microbars. A description of exemplary results and mechanical properties of concrete with microbars can be found in the literature [1, 2, 3].

Testing methodology

Concrete mixtures with different contents of microbars in the concrete volume were designed



Photo 1. Microbars used for tests

Fot. 1. Mikropręty użyte do badań

Photo: authors

Fot.: autorzy

Nowym produktem stosowanym jako zbrojenie rozproszone są mikropręty. Mają one zbliżoną długość do włókien, ale w przeciwieństwie do nich charakteryzują się sztywnością przestrzenną, co pozwala na wyprodukowanie mikroprętów o różnym kształcie. Rozróżniamy m.in. mikropręty proste, faliste i zakończone haczykami. Tak samo jak włókna, można wykonywać je z różnych materiałów, takich jak stal, szkło, polimery lub bazalt. Mikropręty są odporne na korozję w przeciwieństwie do stali zbrojeniowej.

W celu oceny możliwości stosowania mikroprętów bazaltowych jako zbrojenia rozproszonego w elementach betonowych i korzyści z tego wynikających przeprowadzono badania właściwości mechanicznych, a także parametrów mecha-

niki pękania betonu z tymi mikroprętami. Do badań użyto mikroprętów prostych o długości 50 mm i średnicy 1 mm (fotografia 1). Naukowcy podejmują liczne badania nad właściwościami mechanicznymi betonu z mikroprętami. Opis przykładowych wyników i właściwości mechanicznych betonu z mikroprętami można znaleźć w literaturze [1, 2, 3].

Metoda badań

Zaprojektowano mieszanki betonowe o różnej zawartości mikro-

prętów w objętości betonu (1,5 kg/m³ – mieszanka oznaczona M15; 2,5 kg/m³ – M25; 3,5 kg/m³ – M35). Zawartość mikroprętów stanowiła odpowiednio 0,058, 0,096 i 0,135% objętości. W celu porównania określono również właściwości

¹⁾ Białystok University of Technology, Doctoral School

²⁾ Białystok University of Technology, Faculty of Civil Engineering and Environmental Sciences

³⁾ Warsaw University of Technology, Faculty of Civil Engineering

^{*} Address for correspondence: rafal.kostro@sd.pb.edu.pl

(1.5 kg/m³ – mix designated M15; 2.5 kg/m³ – M25; 3.5 kg/m³ – M35). The microbar content represented 0.058%, 0.096% and 0.135% by volume, respectively. The mechanical properties and fracture mechanics parameters of concrete without the addition of dispersed reinforcement (designated as B) were also determined for comparison. CEM I 43.5 R cement was used for the concrete in an amount of 320 kg/m³ in all formulations. The w/c [water/cement] ratio was 0.5. 732 kg/m³ of aggregate in the 0 – 2 mm fraction, 874 kg/m³ of aggregate in the 2 – 8 mm fraction and 329 kg/m³ of aggregate in the 8 – 16 mm fraction were used for the reference concrete mix. The microbars were dosed volumetrically, reducing an adequate amount of aggregate. In order to ensure proper workability of the concrete mixture, a superplasticizer of 3.2 kg/m³ was used, which accounted for 1% of the weight of the cement.

The preparation of the concrete mixes started with dry mixing of the aggregates, followed by the addition of cement and gradually water with superplasticizer. Microbars were the final ingredient. They were introduced into the concrete mix continuously so that the process took no longer than 1 minute. This method of applying the dispersed reinforcement prevented it from clumping together in so-called hedgehogs, i.e., clusters of microbars, and allowed it to be evenly distributed in the volume of the concrete mixture.

The research program included the determination of compressive strength, flexural tensile strength, longitudinal modulus of elasticity and concrete fracture mechanics parameters such as critical crack tip opening displacement (CTOD_c); critical stress intensity factor (K_{Ic}) and critical primary crack length (a_c) and the Q parameter. The compressive strength was tested on 100x100x100 mm cubic samples according to EN 12390-3: 2011 [4], and the tensile strength was determined on 100x100x400 mm samples in a three-point bending test according to EN 12390-5: 2011 [5]. The longitudinal modulus of elasticity was tested on cylindrical samples with a diameter of 150 mm and a height of 300 mm according to EN 12390-13:2011 [6]. Fracture mechanics parameters were tested using 100x100x400 mm samples according to the procedure recommended by RILEM (TC 89-FMT Recommendation) [7]. At least three meaningful results were obtained in each test.

The samples for testing fracture mechanics parameters had a primary fracture made in the form of a narrow U-shaped notch 30 mm deep and 3 mm wide. The fracture was made 24 h before the test with a diamond saw in the middle of the sample span at the bottom of the sample. The tests were carried out after the samples had been seasoned in water for 28 days. The load was applied at the center of the specimen span (Figure 1). A view of the test stand is shown in Photo 2. The width of the fracture opening was measured using an extensometer placed at the outlet of the pri-

mechaniczne i parametry mechaniki pękania betonu bez dodatku zbrojenia rozproszonego (oznaczonego B). Do betonu zastosowano cement CEM I 42.5 R w ilości 320 kg/m³ we wszystkich recepturach. Współczynnik w/c wynosił 0,5. Do referencyjnej mieszanki betonowej użyto 732 kg/m³ kruszywa frakcji 0 – 2 mm, 874 kg/m³ kruszywa frakcji 2 – 8 mm i 329 kg/m³ kruszywa frakcji 8 – 16 mm. Mikropręty dozowano objęściowo, redukując adekwatną ilość kruszywa. W celu zapewnienia właściwej urabialności mieszanki betonowej zastosowano superplastyfikator w ilości 3,2 kg/m³, co stanowiło 1% masy cementu.

Wykonanie mieszanek betonowych rozpoczęto od wymieszania kruszyw na sucho, a następnie dodano cement i stopniowo wodę z superplastyfikatorem. Ostatnim składnikiem były mikropręty. Wprowadzono je do mieszanki betonowej w sposób ciągły, by proces ten trwał nie dłużej niż 1 min. Taki sposób aplikowania zbrojenia rozproszonego zapobiegał jego zbijaniu się w tzw. jeże, czyli zbitki mikroprętów i umożliwiał równomierne ich rozmieszczenie w objętości mieszanki betonowej.

Program badań obejmował wyznaczenie wytrzymałości na ściskanie, wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu, modułu sprężystości podłużnej oraz parametrów mechaniki pękania betonu, takich jak: krytyczne rozwarcie szczeliny pierwotnej (CTOD_c); krytyczny współczynnik intensywności naprężeń (K_{Ic}) i krytyczna długość szczeliny pierwotnej (a_c) oraz parametr Q. Wytrzymałość na ściskanie badano na próbkach sześciennych 100×100×100 mm zgodnie z PN-EN 12390-3:2011 [4], a wytrzymałość na rozciąganie została wyznaczona na próbkach o wymiarach 100×100×400 mm w próbie trójpunktowego zginania zgodnie z normą PN-EN 12390-5:2011 [5]. Moduł sprężystości podłużnej badano na próbkach cylindrycznych o średnicy 150 mm i wysokości 300 mm wg normy PN-EN 12390-13:2011 [6]. Badania parametrów mechaniki pękania przeprowadzono z wykorzystaniem próbek o wymiarach 100×100×400 mm zgodnie z procedurą rekomendowaną przez RILEM (TC 89-FMT Recommendation) [7]. W każdym badaniu otrzymano co najmniej trzy miarodajne wyniki.

Próbki do badania parametrów mechaniki pękania miały wykonaną szczelinę pierwotną w postaci wąskiego karbu w kształcie litery „U” o głębokości 30 mm i szerokości 3 mm. Szczelinę wykonano 24 h przed badaniem za pomocą piły diamentowej w środku rozpiętości próbki w jej dolnej części.

Testy przeprowadzono po 28 dniach sezonowania próbek w wodzie. Obciążenie przykładano w środku rozpiętości próbki (rysunek 1). Widok stanowiska badawczego przedstawiono na fotografii 2. Szerokość rozwarcia szczeliny była mierzona za pomocą ekstensometru umieszczonego przy wylocie szczeliny pierwotnej. Pomiar rozwarcia wylotu tej szczeliny następował w sposób

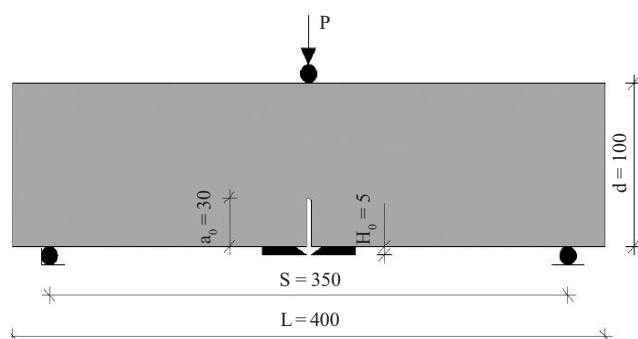


Fig. 1. Scheme of support and load of sample for concrete fracture mechanics parameters tests

Rys. 1. Schemat podparcia i obciążenia próbki do badania parametrów mechaniki pękania betonu

Fig.: authors

Rys.: autorzy

mary fracture. The outlet opening of this fracture was measured continuously and the results were recorded automatically in relation to the load value. This value was controlled so as to maintain a constant increment in primary fracture opening over time. As the force increased, there was an increase in the crack tip opening displacement CTOD. The rate of load application was chosen to achieve the maximum load on the sample in 5 minutes. When the force reached 95% of the maximum load on the specimen, the load was relieved to 50 N. The sample was then loaded once again. The value of the maximum force in each successive cycle was lower. In total, the load-unload cycles were repeated four times and then the sample was loaded until destruction.



Photo 2. Test stand for determining the critical values of concrete fracture mechanics parameters
 Fot. 2. Stanowisko badawcze do wyznaczenia krytycznej wartości parametrów mechaniki pęknięcia betonu

ciągły, a wyniki rejestrowano automatycznie w odniesieniu do wartości obciążenia. Wartość tę kontrolowano tak, aby utrzymać stały przyrost rozwarcia szczeliny pierwotnej w czasie. Wraz ze wzrostem siły następował przyrost wartości rozwarcia wierzchołka szczeliny CTOD. Szybkość przykładania obciążenia dobrano tak, aby uzyskać maksymalne obciążenie próbki w czasie 5 min. Po osiągnięciu przez siłę wartości 95% obciążenia maksymalnego próbki następowało odciążenie do wartości 50 N. Następnie próbkę obciążano po raz kolejny. Wartość maksymalnej siły w każdym kolejnym cyklu była mniejsza. Łącznie cykle obciążenie – odciążenie powtórzono czterokrotnie, a następnie obciążano próbkę aż do zniszczenia.

Results

Based on the analysis of the test results (Table 1), it was found that the introduction of microbars at 1.5 kg/m³ did not significantly increase the compressive strength f_c compared to the reference concrete, while their introduction at 2.5 and 3.5 kg/m³ resulted in strength increases of 11% and 12%, respectively, with respect to the control concrete.

The bending tensile strength f_t also increased with the addition of microbars. For M15 concrete, the increase was 4%, while M25 and M35 concretes were up 9% and 14%, respectively. The value of the longitudinal modulus of elasticity of the concrete E did not change significantly with the addition of microbars.

The results of the tests of concrete fracture mechanics parameters are graphs of the force P on the opening of the crack mouth opening displacement CMOD (Figure 2), which are the basis for describing the fracture behavior of concrete samples. From the analysis of the graphs, we can determine the changes in the properties of concrete as

Wyniki

Na podstawie analizy wyników badań (tabela 1) stwierdzono, że wprowadzenie mikroprętów w ilości 1,5 kg/m³ nie zwiększa istotnie wytrzymałości na ściskanie f_c w porównaniu z betonem referencyjnym, natomiast wprowadzenie ich w ilości 2,5 i 3,5 kg/m³ powodowało zwiększenie wytrzymałości odpowiednio o 11 i 12% w odniesieniu do betonu kontrolnego.

Wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu f_t zwiększała się również na skutek wprowadzenia dodatku mikroprętów. W przypadku betonu M15 wzrost wynosił 4%, natomiast betonów M25 i M35 odpowiednio o 9% i 14%. Wartość modułu sprężystości podłużnej betonu E nie zmieniła się w istotny sposób wraz z dodatkiem mikroprętów.

Wynikiem badania parametrów mechaniki pęknięcia betonu są wykresy zależności siły P od rozwarcia wierzchołka szczeliny pierwotnej CMOD (rysunek 2), będące podstawą do opisu zachowania się próbek betonowych podczas pęknięcia. Na podstawie analizy wykresów możemy określić zmiany właściwości betonu jako

Table 1. Average values and measurement results scatters of mechanical properties of concrete after 28 days of curing – compressive strength f_c , tensile strength f_t and modulus of elasticity E

Tabela 1. Średnie wartości oraz rozrzuty wyników pomiarów właściwości mechanicznych betonów po 28 dniach dojrzewania – wytrzymałość na ściskanie f_c , wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu f_t oraz moduł sprężystości podłużnej E

Parameter/ Parametr	Type of concrete/Rodzaj betonu			
	B	M15	M25	M35
f_c [MPa]	53,0 ± 1,7	54,0 ± 2,4	58,7 ± 0,3	60,3 ± 2,8
f_t [MPa]	3,06 ± 0,1	3,18 ± 0,1	3,34 ± 0,21	3,50 ± 0,32
E [GPa]	35,1 ± 1,1	35,4 ± 0,6	35,7 ± 1,8	36,5 ± 0,5

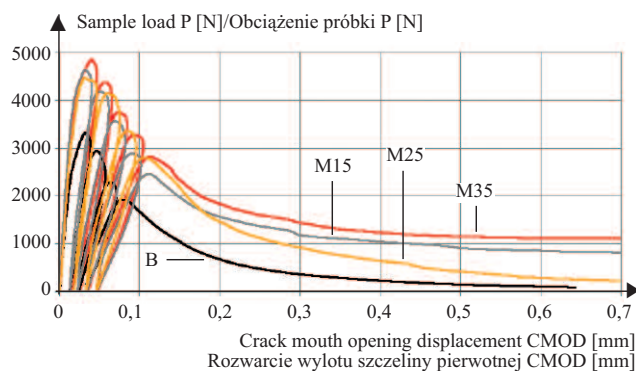


Fig. 2. Dependence of the load – crack mouth opening displacement of reference concrete and fiber reinforced concrete

Rys. 2. Zależność obciążenia od rozwarcia szczeliny betonu referencyjnego i betonów z dodatkiem mikroprętów

a brittle material depending on the content of basalt microbars in the volume of concrete.

Examples of curves for B, M15, M25 and M35 concretes are shown in Figure 2. In the first phase of the samples prior to the initiation of primary fracture propagation, the stresses were transmitted through the concrete and the microbars. This was the stage of elastic work. The graph of the force dependence on the opening of the primary fracture was linear. The shortest linear section of the initial part of the graph was recorded for the reference concrete (B). These sections were parallel to each other for all samples. The higher amount of dispersed reinforcement increased the maximum load values and lengthened the linear part of the P-CMOD diagram. These parts became less and less steep with each successive load cycle. In contrast, the crack mouth opening displacement width P-CMOD corresponding to the maximum load on the sample was similar for all concretes. Each successive load cycle was characterized by a lower maximum load value. After the fourth cycle, the samples were loaded until destruction. A descending section of the P-CMOD curve called attenuation or softening was observed. Concrete does not lose its load-bearing capacity with increasing deformation but is characterized by its ductility. As the primary crack mouth opening displacement width CMOD increased, there was a slow decrease in the value of the load P. The crack at the tip of the primary crack propagated deep into the sample. As the crack propagated, the basalt microbars present in its path began to transfer stresses between the surfaces of the resulting crack by tension. This phenomenon is called the “bridging effect.” Further crack propagation increased the stresses in the microbars and between the microbars and the cement matrix. Ultimately, the stresses caused the microbars to break or pull out of the concrete. This is illustrated by the sudden drops in load on the P-CMOD graphs.

An analysis of the P-CMOD dependence diagrams (Figure 2) showed that the addition of microbars causes significant changes in the behavior of the concrete both before and after crack initiation and propagation. The value of the maximum transmitted force was 50% higher for the M35 samples compared to the reference concrete (Table 1). The M15 and M25 concrete samples showed an increase in failure force P of 20 and 40 per cent, respectively, with respect to the control concrete. The maximum primary crack mouth opening displacement CMOD for all specimens with microbars was over 4.0 mm, and in the case of the reference concrete, the loss of stress transfer capacity of the sample occurred before the crack mouth opening displacement width of 1.0 mm was reached.

Based on the P-CMOD diagrams and the calculation procedure recommended by RILEM (TC 89-FMT Recommendation) [6], the concrete fracture mechanics parameters (Table 2) were calculated as material constants. Those parameters are as follows: **critical primary crack tip opening displacement (CTOD)**; **critical stress intensity factor (K_{Ic})** and **critical primary crack length (a_c) Q parameter**. In order to calculate these parameters, the values of the susceptibility of the concrete under C_1 loading and C_u

materiału kruchego w zależności od zawartości mikroprętów bazaltowych w objętości betonu. Przykładowe krzywe w przypadku betonów B, M15, M25 i M35 przedstawiono na rysunku 2. W pierwszej fazie pracy próbek przed inicjacją propagacji szczeliny pierwotnej naprężenia były przekazywane przez beton oraz mikropręty. Był to etap pracy sprężystej. Wykres zależności siły od rozwarcia szczeliny pierwotnej był liniowy. Najkrótszy, liniowy odcinek początkowej części wykresu odnotowano dla betonu referencyjnego (B). Odcinki te były do siebie równoległe w przypadku wszystkich próbek. Większa ilość zbrojenia rozproszonego spowodowała zwiększenie wartości obciążenia maksymalnego i wydłużenie liniowej części wykresu P-CMOD. Części te stawały się coraz mniej strome z każdym kolejnym cyklem obciążeniowym. Natomiast szerokość rozwarcia wylotu szczeliny pierwotnej P-CMOD odpowiadająca maksymalnemu obciążeniu próbki była zbliżona w przypadku wszystkich betonów. Każdy kolejny cykl obciążeniowy charakteryzował się mniejszą wartością obciążenia maksymalnego. Po czwartym cyklu, próbki były obciążane aż do zniszczenia. Obserwowano opadający odcinek krzywej P-CMOD nazywany osłabieniem lub miękniem. Beton wraz ze wzrostem odkształceń nie traci zdolności do przenoszenia obciążeń, lecz charakteryzuje się ciągliwością. Wraz z przyrostem rozwarcia wylotu szczeliny pierwotnej CMOD następował powolny spadek wartości obciążenia P. Rysa u wierzchołka szczeliny pierwotnej propagowała w głąb próbki. Wraz z propagacją rysy, mikropręty bazaltowe występujące na jej drodze zaczynały przenosić naprężenia między powierzchniami powstającej szczeliny przez rozciąganie. Zjawisko to nosi nazwę „efektu mostkowania”. Dalsza propagacja szczeliny zwiększała naprężenia w mikroprętach oraz między mikroprętami a matrycą cementową. Finalnie, naprężenia powodowały zerwanie mikroprętów lub wyrwanie ich z betonu. Obrazują to nagle spadki obciążenia na wykresach P-CMOD.

Analiza wykresów zależności P-CMOD (rysunek 2) wykazała, że dodatek mikroprętów powoduje istotne zmiany zachowania betonu zarówno przed powstaniem rysy, jak i po jej zainicjowaniu i propagacji. Wartość maksymalnej przenoszonej siły była o 50% większa w przypadku próbek M35 w porównaniu z betonem referencyjnym (tabela 1). W przypadku próbek betonu M15 i M25 stwierdzono wzrost siły niszczącej P odpowiednio o 20 i o 40% w odniesieniu do betonu kontrolnego. Maksymalna rozwarłość wylotu szczeliny pierwotnej CMOD w przypadku wszystkich próbek z mikroprętami wynosiła ponad 4,0 mm, a w przypadku betonu referencyjnego utrata zdolności przenoszenia naprężeń przez próbkę następowała przed osiągnięciem szerokości rozwarcia wylotu szczeliny o wartości 1,0 mm.

Na podstawie wykresów P-CMOD oraz procedury obliczeniowej, rekomendowanej przez RILEM (TC 89-FMT Recommendation) [6], obliczono parametry mechaniki pęknięcia betonu (tabela 2) będące stałymi materiałowymi. Parametry te to: **krytyczne rozwarcie szczeliny pierwotnej (CTOD)**; **krytyczny współczynnik intensywności naprężeń (K_{Ic})** i **krytyczna długość szczeliny pierwotnej (a_c) oraz parametr Q**. W celu obliczenia tych parametrów należy określić wartości podatności betonu przy obciążeniu C_1 i odciążeniu

unloading of the sample in the first test cycle must be determined. A characteristic feature of the concretes tested was the greater susceptibility of the sample in unloading than in loading. Furthermore, both of these values decreased with increasing microbar content. This demonstrates the reduced susceptibility of the sample to deformation due to external loading as a result of the addition of dispersed reinforcement in the form of basalt microbars. When determining the fracture mechanics parameters of concrete, the longitudinal modulus of elasticity is also calculated. The resulting modulus values are similar to those tested when using cylindrical samples (Table 1).

Another parameter of concrete fracture mechanics is the **critical primary crack length (a_c)**, i.e., at the point at which the stress-carrying capacity of the sample is lost. The higher the value of this parameter, the better the mechanical properties of the sample after crack propagation. The results show an increase in the critical length of the primary fracture as the basalt microbar content of the concrete volume increases. On the basis of tests of the fracture mechanics of concrete, the value of the critical stress intensity factor was also calculated (K_{Ic}). As the content of basalt microbars in the volume of concrete increased, the value of the K_{Ic} parameter increased, indicating that the concrete was more resistant to cracking. When comparing the K_{Ic} values of the M35 and control concrete, an increase of up to 60% was identified. There was also a marked increase for M15 concrete (20%) and M25 concrete (45%).

An analysis of the test results also showed an increase in the critical value of the primary crack tip opening displacement (CTOD_c) as the basalt microbars content of the concrete volume increased. The introduction of microbars at 1.5 kg/m³ induced an increase of 22% compared to the reference concrete, while at 2.5 and 3.5 kg/m³ an increase of 33% and 42%, respectively.

An additional parameter describing the properties of concrete is the Q parameter defined by equation (1)

$$Q = \left(\frac{E \cdot \text{CTOD}_c}{K_{Ic}} \right)^2 \quad (1)$$

where:

E – longitudinal modulus of elasticity of concrete;
CTOD_c – critical primary crack tip opening displacement;
 K_{Ic} – critical stress intensity factor.

For concrete, the value of the Q parameter should be 100 – 350 mm (the higher its value, the less brittle the material is). The tests carried out showed that the value of this parameter increased with an increase in the number of microbars in the volume of concrete. In the case of M35 concrete, the value of

Table 2. Average values of fracture mechanics parameters of concrete
Tabela 2. Średnie wartości parametrów mechaniki pęknięcia betonu

Parameters/ Parametry	Type of concrete/Rodzaj betonu			
	B	M15	M25	M35
P _{max} [N]	3319 ± 125	3963 ± 250	4637 ± 294	4852 ± 265
C _i [m/N·10 ⁻⁹]	4,73 ± 0,15	4,60 ± 0,13	3,38 ± 0,08	3,46 ± 0,18
C _u [m/N·10 ⁻⁹]	7,87 ± 0,13	7,76 ± 0,11	5,86 ± 0,14	5,22 ± 0,15
E [GPa]	33,51 ± 0,55	33,99 ± 0,61	34,26 ± 0,72	35,53 ± 0,49
a _c [mm]	49,94 ± 0,73	50,62 ± 0,91	51,97 ± 0,88	53,97 ± 0,72
K _{Ic} [MN/m ^{3/2}]	1,108 ± 0,098	1,340 ± 0,077	1,612 ± 0,083	1,763 ± 0,110
CTOD _c [mm]	0,0223 ± 0,0089	0,0272 ± 0,0071	0,0297 ± 0,0062	0,0316 ± 0,0057
Q [mm]	244,1 ± 25,0	261,72 ± 35,7	298,51 ± 27,8	360,15 ± 35,9

niem C_u próbki w pierwszym cyklu badania. Charakterystyczną cechą badanych betonów była większa podatność próbki w odciążeniu niż w obciążeniu. Ponadto obie te wartości zmniejszały się wraz ze wzrostem zawartości mikroprętów. Świadczy to o zmniejszającej się podatności próbki na odkształcenia na skutek obciążenia zewnętrznego w wyniku dodatku zbrojenia rozproszanego w postaci mikroprętów bazaltowych. W trakcie wyznaczania parametrów mechaniki pęknięcia betonu oblicza się również moduł sprężystości podłużnej. Otrzymane wartości modułów są zbliżone do badanych w przypadku zastosowania próbek walcowych (tabela 1).

Kolejnym parametrem mechaniki pęknięcia betonu jest **krytyczna długość szczeliny pierwotnej (a_c)**, tzn. w chwili utraty zdolności przenoszenia naprężeń przez próbkę. Im większa jest wartość tego parametru, tym próbka wykazuje lepsze właściwości mechaniczne po propagacji rysy. Wyniki badań wykazują zwiększenie krytycznej długości szczeliny pierwotnej wraz ze wzrostem zawartości mikroprętów bazaltowych w objętości betonu. Na podstawie badań mechaniki pęknięcia betonu obliczono również wartość krytycznego współczynnika intensywności naprężeń (K_{Ic}). Wraz ze wzrostem zawartości mikroprętów bazaltowych w objętości betonu wartość parametru K_{Ic} zwiększała się, co świadczy o większej odporności betonu na pęknięcie. Porównując wartości K_{Ic} betonu M35 i kontrolnego, stwierdzono wzrost jego wartości o nawet 60%. Wyraźny wzrost odnotowano również w przypadku betonu M15 (20%) i betonu M25 (45%).

Analiza wyników badań wykazała również wzrost krytycznej wartości rozwarcia szczeliny pierwotnej (CTOD_c) wraz ze wzrostem zawartości mikroprętów bazaltowych w objętości betonu. Wprowadzenie mikroprętów w ilości 1,5 kg/m³ wywołało wzrost o 22% w porównaniu z betonem referencyjnym, natomiast w ilości 2,5 i 3,5 kg/m³ odpowiednio o 33 i 42%.

Dodatkowym parametrem opisującym właściwości betonu jest parametr Q zdefiniowany za pomocą wzoru (1)

$$Q = \left(\frac{E \cdot \text{CTOD}_c}{K_{Ic}} \right)^2 \quad (1)$$

gdzie:

E – moduł sprężystości podłużnej betonu;
CTOD_c – krytyczne rozwarcie szczeliny pierwotnej;
 K_{Ic} – krytyczny współczynnik intensywności naprężenia.

W przypadku betonu wartość parametru Q powinna wynosić 100 – 350 mm (im większa jego wartość, tym materiał jest mniej kruchy). Przeprowadzone badania wykazały, że wartość tego parametru zwiększyła się wraz ze wzrostem liczby mikroprętów w objętości betonu. W przypadku betonu M35 war-

the Q parameter was approximately 50% higher compared to the reference concrete. For M15 concrete, the increase was less than 10%, and for M25 concrete it was just over 24%.

Simultaneously with the recording of the P-CMOD charts, plots of the dependence of the P load on the deflection δ at the center of the sample span were recorded. A greater increase in deflection under external load was observed for concrete samples without the addition of microbars than for samples with the addition of microbars. The introduction of dispersed reinforcement in M35 and M25 concretes significantly reduced the deflection value. From the dependence of the load on the deflection of the sample, the fracture energy was determined by calculating the area under the P- δ diagram and relating it to the newly created area after the sample fractured according to equation (2):

$$G_F = \frac{\int_0^{\delta_{max}} P(\delta)\delta + mg\delta_{max}}{(d - a_0)b} \quad (2)$$

where:

- δ_{max} – deflection of the sample at the time of destruction;
- $P(\delta)$ – value of the sample load as a function of its deflection;
- δ – deflection of the sample;
- m – mass of the sample;
- g – gravitational acceleration;
- d – cross-sectional height;
- a_0 – initial length of the primary crack;
- b – cross-sectional width.

The fracture energy is defined as the energy absorbed by the sample material in the process zone (Table 3). Based on the analysis of the test results, it can be concluded that the samples with the addition of microbars had up to two- and three-times higher energy absorption during cracking than samples without microbars.

Conclusions

Based on the analysis of the test results, it was concluded that, for the assessed microbar content of the concrete volume, the presence of the dispersed reinforcement results in a slight increase in the compressive strength and flexural tensile strength of the concrete. The greater the amount of dispersed reinforcement addition in the concrete mix, the greater the increase in strength. At the same time, the change in the value of the longitudinal modulus of elasticity was negligible. The higher tensile strength will reduce the number of cracks and their opening in the structural elements and thus reduce the exposure of the reinforcement to external, environmental conditions, reducing the risk of corrosion.

Based on the results, the addition of microbars at 1.5, 2.5, 3.5 kg/m³ significantly improves the fracture mechanics parameters of concrete. Concrete samples with the addition of microbars showed a higher value of critical primary crack tip

tość parametru Q była większa o ok. 50% w porównaniu z betonem referencyjnym. W przypadku betonu M15 wzrost był mniejszy niż 10%, a w przypadku betonu M25 wynosił nieco ponad 24%.

Jednocześnie z rejestracją wykresów P-CMOD rejestrowano wykresy zależności obciążenia P od ugięcia δ w środku rozpiętości próbki. W przypadku próbek z betonu bez dodatku mikroprętów obserwowano większy przyrost ugięcia pod obciążeniem zewnętrznym niż w przypadku próbek z dodatkiem mikroprętów. Wprowadzenie zbrojenia rozproszonego do betonów M35 i M25 wyraźnie zmniejszyło wartość ugięcia. Na podstawie zależności obciążenia od ugięcia próbki wyznaczono energię pęknięcia, obliczając pole powierzchni pod wykresem P- δ i odnosząc je do nowo powstałej powierzchni po pęknięciu próbki zgodnie z wzorem (2):

$$G_F = \frac{\int_0^{\delta_{max}} P(\delta)\delta + mg\delta_{max}}{(d - a_0)b} \quad (2)$$

gdzie:

- δ_{max} – ugięcie próbki w chwili zniszczenia;
- $P(\delta)$ – wartość obciążenia próbki w funkcji jej ugięcia;
- δ – ugięcie próbki;
- m – masa próbki;
- g – przyspieszenie ziemskie;
- d – wysokość przekroju poprzecznego;
- a_0 – długość początkowa szczeliny pierwotnej;
- b – szerokość przekroju poprzecznego.

Table 3. Fracture energy of samples

Tabela 3. Energia pęknięcia próbek

Parameters/ Parametr	Type of concrete/Rodzaj betonu			
	B	M15	M25	M35
G_F [Nm/m ²]	164,8 ± 23,5	333,5 ± 32,8	420,7 ± 39,9	482,0 ± 45,5

Energię pęknięcia definiuje się jako energię absorbowaną przez materiał próbki w strefie procesowej (tabela 3). Na podstawie analizy wyników badań można wnioskować, że próbki z dodatkiem

mikroprętów charakteryzowały się nawet dwu- trzykrotnie większą absorpcją energii podczas pęknięcia niż próbki bez mikroprętów.

Wnioski

Na podstawie analizy wyników badań stwierdzono, że w przypadku ocenianej zawartości mikroprętów w objętości betonu, obecność zbrojenia rozproszonego powoduje nieznaczne zwiększenie wytrzymałości na ściskanie i wytrzymałości na rozciąganie betonu przy zginaniu. Im większa ilość dodatku zbrojenia rozproszonego w mieszance betonowej, tym większy jest wzrost jego wytrzymałości. Jednocześnie zmiana wartości modułu sprężystości podłużnej była pomijalna. Większa wytrzymałość na rozciąganie redukuje liczbę rys oraz ich rozwarstwo w elementach konstrukcyjnych, a co za tym idzie zmniejsza ekspozycję zbrojenia na warunki zewnętrzne, środowiskowe, redukując zagrożenie korozją.

Na podstawie wyników badań stwierdzono, że dodatek mikroprętów w ilościach 1,5, 2,5, 3,5 kg/m³ znacznie poprawia parametry mechaniki pęknięcia betonu. Próbki betonu z dodatkiem mikroprętów wykazywały większą wartość krytyczne-

opening displacement (CTOD_c), critical stress intensity factor (K_{Ic}), fracture energy (G_f) and critical primary crack length (a_c) and maximum load. In addition, dispersed reinforcement increases resistance to the initiation and propagation of cracking in concrete elements and, consequently, to cracking and fracture of concrete with dispersed reinforcement in structures. Further research into concrete with microbars should broaden the possibilities for their application.

Received: 02.06.2024

Revised: 02.07.2024

go rozwarcia szczeliny pierwotnej (CTOD_c), krytycznego współczynnika intensywności naprężeń (K_{Ic}), energii pęknięcia (G_f) i krytycznej długości szczeliny pierwotnej (a_c) oraz maksymalnego obciążenia. Ponadto zbrojenie rozproszone zwiększa odporność na inicjację i propagację zarysowania elementów betonowych, a w efekcie na zarysowanie i pęknięcie betonu ze zbrojeniem rozproszonym w konstrukcjach. Dalsze badania betonu z mikroprętami powinny poszerzyć możliwości ich zastosowania.

Wpłynął do redakcji: 02.06.2024 r.

Otrzymano poprawiony po recenzjach: 02.07.2024 r.

Literature

- [1] Furtos G, Prodan D, Sarosi C, Moldovan M, Korniejenko K, Miller L, Iveta N. Mechanical Properties of MiniBars™ Basalt Fiber-Reinforced Geopolymer Composites. *Materials*. 2024; 17 (1): 248.
- [2] Abbas Ashour Alaraza, Hayder; Kharun, Makhmud; Chiadighikaobi, Paschal Chimereze. *Cogent Engineering*. The effect of minibars basalt fiber fraction on mechanical properties of high-performance concrete. 2022; 12, Vol. 9 (1), Article 2136603.
- [3] Abbas Ashour Alaraza, Hayder, Makhmud Kharun, Paschal Chimereze Chiadighikaobi. The Effect of Minibars Basalt Fiber Fraction on Mechanical Properties of High-Performance Concrete. *Cogent engineering*

ering 9, no. 1 (2022): Cogent engineering, 2022-12, Vol. 9 (1), Article 2136603.

[4] PN-EN 12390-3:2011 Badania betonu, Część 3: Wytrzymałość na ściskanie próbek do badań. 2011.

[5] PN-EN 12390-5:2011 Badania betonu, Część 5: Wytrzymałość na zginanie próbek do badań. 2011.

[6] PN-EN 12390-5:2011 Badania betonu, Część 13: Oznaczenie siecznego modułu sprężystości stwardniałego betonu przy ścisnaniu. 2011.

[7] Recommendation TC 89-FMT RILEM, *Materials and Structures*, Determination of fracture parameters (K_{Ic} and CTOD_c) of plain concrete using three-point bend test 23, 1990.