

Marek Jašek, Kateřina Stejskalová, Jan Hurta, Jiří Brožovský

VSB-TU of Ostrava, Faculty of Civil Engineering, Ostrava-Poruba, Czech Republic

Badania fibrokompozytu cementowego z dużym udziałem przemysłowych produktów ubocznych, twardniejącego w warunkach naprężeń pokrytycznych

Research of the fiber reinforced strain hardening cementitious composite with high volume of industrial by-products

1. Wprowadzenie

Kompozytem nazywamy materiał wytworzony z dwóch lub więcej składników o różnych właściwościach, dający produkt o nowych właściwościach. Jednym z nich jest kompozyt cementowy wzmocniany włóknami, z dodatkiem odpadów przemysłowych. Jest to z ekologicznego punktu widzenia „zielony” rodzaj kompozytu cementowego wzmocnianego włóknami, dzięki któremu ogranicza się ilość odpadów, zużycie energii oraz chroni się naturalne zasoby surowcowe (1, 2).

Kompozyt cementowy twardniejący w warunkach naprężeń pokrytycznych jest drobnoziarnistym betonem o dobrej urabialności, otrzymanym z cementu portlandzkiego, wzmocnianego krótkimi włóknami. Kruszywo stanowi drobny żwir o wielkości ziaren od μm do mm . Jedną z właściwości tego kompozytu jest jego „wzmocnianie” po pojawieniu się pierwszej rysy, to znaczy naprężenie rośnie wraz z odkształceniem, aż do osiągnięcia maksymalnej wytrzymałości na rozciąganie (3).

Można wyróżnić dwie fazy charakterystyczne dla kompozytu cementowego wzmocnianego włóknami: w pierwszej fazie kompozyt zachowuje się jak beton o normalnej wytrzymałości, a w drugiej jak metal, gdy pojawiają się spękania po osiągnięciu granicy plastyczności, w pierwszej fazie. Pierwsze spękanie pojawia się zwykle przy odkształceniu $\varepsilon \approx 0,01\%$. Kiedy odkształcenie osiągnie $\varepsilon \approx 1\%$, następuje propagacja spękania do około $60\ \mu\text{m}$. Dalsze obciążanie powoduje wzrost ilości mikrospekkań, jednak ich rozmiar pozostaje na poziomie $60\ \mu\text{m}$ (4), aż do momentu dalszej propagacji jednego z nich (5).

Pomiędzy włóknami, a matrycą cementową oraz na granicy pomiędzy tymi materiałami, w kompozycie występuje efekt synergiczny. W wyniku wiązań mikro-mechanicznych powstaje wiele ciasno rozmieszczonych mikrospekkań. Efektywne wiązanie pomiędzy matrycą cementową i włóknami tworzy się poprzez maksymalne „klinowanie”, które wiąże się z dużą wytrzymałością (6), po pierwszym pęknięciu, aż do osiągnięcia maksymalnej wytrzymałości włókien na rozciąganie.

1. Introduction

A composite material is a material made from two or more components with different properties, yielding a product with novel characteristics. One of these composites is a fiber reinforced cementitious composite with strain hardening made partially from industrial by-products. It is an environmental, “green” type of fiber reinforced cementitious composite, which produces less waste, uses less natural resources and less energy (1, 2).

Fiber reinforced cementitious composite material with so called “strain hardening” is a very tractable fine-grained concrete with Portland cement matrix hardened by short fibers. This composite material has a fine gravel – sizes μm to mm , as aggregate. One of the properties of a fiber reinforced cementitious composite is that after a first crack appears, the material “hardens”, i.e. the stress increases with the strain until the ultimate tensile strength is reached (3).

The behavior of a fiber reinforced cementitious composite can be described by two phases: in the first phase, the composite behaves as a concrete with normal strength, in the second phase as a metal, when fractures appear after reaching the yield point in the first phase. The first fracture appears generally for strain $\varepsilon \approx 0.01\%$. When the strain reaches $\varepsilon \approx 1\%$, the fracture is propagation to approximately $60\ \mu\text{m}$. Further loading increases the number of microfractures, but the size of the fractures remains at $60\ \mu\text{m}$ (4) until one of the fractures breaks (5).

There is a synergic interaction between the fibers, the matrix and the boundary of these materials in the composite. Tightly distributed multiple microfractures occur due to micromechanical bonds. An efficient bond between the cement matrix and the fibers is obtained by a maximal wedged , which causes high strength (6) after the first crack and until the ultimate tensile strength of the fibers is reached.

Fiber reinforced cementitious composite is a composite frequently reinforced with glass or polymer fibers. The aggregate is usually microsilica (silica fume), finely ground quartz sand, finely ground

Kompozyty cementowe wzmocnione włóknami zawierają często włókna szklane lub polimerowe. Kruszywo zwykle stanowi pył krzemionkowy, drobno zmielony piasek kwarcowy, drobno zmielony grafit krystaliczny lub popiół lotny. Stosując lokalne materiały można stworzyć wiele wariantów takiego kompozytu. Włókna polimerowe są zazwyczaj polipropylenowe, polietylenowe oraz ostatnio popularne włókna z polialkoholu winylowego (7). Często stosowane są także włókna hybrydowe – mieszanki różnych rodzajów lub włókien o zmiennych długościach. Długość włókien wynosi zazwyczaj kilka milimetrów, a średnica mieści się w mikrometrach. Maksymalny udział objętościowy włókien wynosi 2%.

Podstawowe właściwości fizyczne kompozytów osiąga się bez dużego dodatku włókien, a można je modyfikować za pomocą narzędzi mikromechanicznych (8). Właściwości „inżynierskich” kompozytów cementowych [IKC] są według Li (4) następujące:

- wytrzymałość na ściskanie 20 - 95 MPa
- wytrzymałość na rozciąganie 4 - 12 MPa
- moduł Younga 18 - 34 GPa
- gęstość 950 - 2300 kg·m⁻³

2. Program badań

2.1. Zastosowane materiały i skład mieszanek betonowych

Celem badawczym tej pracy jest częściowe zastąpienie włókien syntetycznych włóknami tekstylnymi, którymi jest materiał odpadowy, pochodzący ze starych opon oraz częściowe zastąpienie piasku kwarcowego odpadowym pyłem skalnym, przy zachowaniu typowego dla tego kompozytu wzmocnienia odkształceniowego. Materiały z trzech następujących grup mogą zastępować: spoiwo czyli cement i kruszywo drobne – piasek oraz włókna.

Do produkcji kompozytów cementowych, wzmocnianych włóknami, zastosowano odpady przemysłowe, pochodzące z kraju morawsko-śląskiego w Czechach, w którym przemysł ma duży wpływ na środowisko. We wszystkich analizowanych przypadkach cement zastępowano częściowo popiołem lotnym (9), pochodzącym z lokalnej elektrowni węglowej w Dětmarovicach.

Do oceny „zielonego” kompozytu autorzy wybrali mieszankę referencyjną klasy M45 – seria 1 i 4. Mieszanki te modyfikowano, zmieniając proporcje materiałów wtórnych. Proporcje masowe składników w podstawowej mieszance M45 są następujące (1, 4): cement = 1,0, popiół lotny = 1,2, piasek kwarcowy = 0,8, woda = 0,56, domieszka = 0,012 i włókna z 2% udziałem objętościowym.

Podstawowe składniki wyjściowe – te same dla wszystkich serii, są następujące: cement, popiół, piasek kwarcowy, woda oraz domieszka.

Jako spoiwo zastosowano cement portlandzki CEM I 42,5R, o dużej wytrzymałości wczesnej, zgodny z normą EN 197-1 (10). Kruszywo stanowił drobny piasek kwarcowy, o wielkości ziaren 0,3-0,1 mm. Skład chemiczny piasku: SiO₂ 99,57%, Al₂O₃ 0,116%,

crystalline graphite or fly ash. Many variants of the composite are made using local materials. The polymer fibers are usually polypropylene (PP), polyethylene (PE) and more recently popular polyvinyl alcohol (PVA) (7). Also popular are hybrid fibers – a combination of different types or lengths of fibers. The fibers' length is generally in the range of millimeters and the diameter in micrometers. The maximal volume fraction V_f of the fibers is 2%.

The basic physical and mechanical properties of the composites are obtained without a large quantity of the fibers and these properties can be modified using micromechanical tools (8). The properties of the Engineered cementitious composite [ECC] are (4):

- compressive strength 20 - 95 MPa
- ultimate tensile strength 4 - 12 MPa
- Young's modulus 18 - 34 GPa
- density 950 - 2300 kg·m⁻³

2. Experimental program

2.1. Materials used and mixture proportions

The research goal of this paper is the partial substitution of synthetic fibers by textile fibers; a secondary product of recycling tires and the partial substitution of the quartz sand by a waste rock dust, while keeping the strain hardening of the composite. There are three groups of a potential material substitution: binder (cement), aggregate (sand) and fibers.

Industrial waste from the Moravia-Silesia Region, whose environment is heavily affected by the industry, is used for the manufacturing of the fiber reinforced cementitious composite. All the tested variants have a partial substitution of the cement with a fly ash (9), from a local coal power plant Dětmarovice.

We selected the mixture with ratios M45 (variants 1 and 4) as the reference for the evaluation of the “green” composite. We then modified the mixtures by changing the ratios of the secondary components. The ratio for the reference components in M45 is, as mass fraction (1, (4): cement (1.0), fly ash (1.2), quartz sand (0.8), water (0.56), additives (0.012) and fibers (2%).

The basic input components (the same for all variants) are cement, fly ash, quartz sand, water and additives.

The Portland cement class 42.5 R with high initial strength, called CEM I 42.5 R according to EN 197-1 (10), was used as the binder. The aggregate was a fine quartz sand, with grain size 0.1 - 0.3 mm. Its chemical composition was: SiO₂ 99.57 %, Al₂O₃ 0.116 %, Fe₂O₃ 0.053 %, TiO₂ 0.113 %, CaO 0.002 % and K₂O 0.003 %.

The additive was the fly ash from a local coal power plant Dětmarovice. The fly ash satisfies the required properties of concrete additives, according to ČSN EN 450-1 (11), it was the class II additive – pozzolana and latent hydraulic compounds. Another additive is the rock dust with particle sizes below 0.063 mm. The rock dust is a by-product from the grinding and sorting aggregate in quarries.

Fe₂O₃ 0,053%, TiO₂ 0,113%, CaO 0,002% i K₂O 0,003%.

Popiół lotny pochodził z elektrowni węglowej w Dětmarovicach. Dodatek ten spełniał wymagania normy ČSN EN 450-1 (11), dotyczące właściwości dodatków do betonu. Popiół lotny stanowił dodatek typu II – dodatki o właściwościach pucolanowych lub utajonych właściwościach hydraulicznych. Kolejnym dodatkiem jest pył skalny, o wielkości ziaren mniejszych od 0,063 mm. Pył skalny jest produktem ubocznym mielenia i sortowania kruszywa w kamieniołomach.

Odpowiednią konsystencję mieszanek uzyskano dzięki dodatkowi superplastyfikatora Glenium 110, który nie zawiera chlorków i spełnia wymagania normy ASTM C 494 (12) dla typu A i C. Domieszka ta produkowana jest na bazie eterów polikarboksyłanowych.

Przygotowano 5 serii porównawczych:

Seria 1 – Kompozyt cementowy wzmocniany włóknami polipropylenowymi – mieszanka referencyjna nr 1.

Seria 2 – Kompozyt cementowy wzmocniany włóknami polipropylenowymi, częściowo zastąpionymi przez włókna tekstylne.

Seria 3 – Kompozyt cementowy wzmocniany włóknami polipropylenowymi częściowo zastąpionymi przez włókna tekstylne, piasek kwarcowy częściowo zastąpiony przez granulát gumowy.

Seria 4 – Kompozyt cementowy wzmocniany włóknami z polialkoholu winylowego, stanowiący mieszankę referencyjną nr 2.

Seria 5 – Kompozyt cementowy wzmocniany włóknami z polialkoholu winylowego, piasek kwarcowy częściowo zastąpiono pyłem skalnym.

Seria 1

Mieszanka zawierała włókna polipropylenowe multifilamentowe Krampe Fibrin, typu PM 12/32, o długości 12 mm, średnicy 32 µm oraz gęstości 900 kg/m³. Skład mieszanki podano w tablicy 1.

Seria 2

W tym przypadku włókna polipropylenowe częściowo zastąpiono odpadowymi włóknami tekstylnymi. Jest to surowiec wtórny, uzyskiwany podczas recyklingu opon. Zastępuje droższe włókna syntetyczne. Włókna tekstylne mają nieregularny kształt, długość do 20 mm, są luźnym materiałem, który nie ma tendencji do sklejanja. Skład mieszanki podano w tabelicy 2.

Tablica 1 / Table 1

SKŁAD KOMPOZYTU CEMENTOWEGO WZMACNIANEGO WŁÓKNAMI – SERIA 1

COMPOSITION OF THE FIBER REINFORCED CEMENTITIOUS COMPOSITE MIXTURE – VARIANT 1

Składnik / Constituent	Cement	Popiół lotny Fly ash	Piasek kwarcowy Quartz sand	Woda Water	Superplastyfikator Superplasticizer	Włókna polipropylenowe PP fibers
Udział / Ratio	1.0	1.2	0.8	0.52	0.033	2%
Zawartość / Content, kg·m ⁻³	583	700	467	298	19	18.2

The consistency of the mixture was ensured by a liquid high performance superplasticizer Glenium 110, which was without chlorides and satisfies the norm ASTM C 494 (12) for A and C type. The superplasticizer Glenium is a compound based on polymeric carboxylate esters.

We made 5 experimental variants for the evaluation of the composite:

Variant 1 – Fiber reinforced cementitious composite with PP fibers (initial mixture no. 1)

Variant 2 – Fiber reinforced cementitious composite with PP fibers, partially substituted by textile fibers

Variant 3 – Fiber reinforced cementitious composite with PP fibers, partially substituted by textile fibers, quartz sand partially substituted by rubber granules

Variant 4 – Fiber reinforced cementitious composite with PVA fibers [initial mixture no. 2]

Variant 5 – Fiber reinforced cementitious composite with PVA fibers, quartz sand, partially substituted by rock dust

Variant 1

To this mixture polypropylene multifilament fibers Krampe Fibrin, type PM 12/32, 12 mm long, 32 µm diameter and 900 kg/m³ density was added. The composition is in the Table 1.

Variant 2

In this testing variant PP fibers was partially replaced by the waste textile fibers. It is a secondary compound with trace element content below 60%, made during the tires recycling. It substitutes the more expensive synthetic fibers. The textile fibers have irregular shape and size up to 20 mm, and are a loose and non-sticky material. Their composition is given in the Table 2.

Variant 3

The hardening element is the same as in variant 2. The aggregate, the quartz sand is partially substituted by the rubber granules; main compound is a styrene-butadiene rubber, with sizes under 1.0 mm. The textile fiber and metal cord was removed from the granules, during preparation. The composition is given in the Table 3.

Tablica 2 / Table 2

SKŁAD KOMPOZYTU CEMENTOWEGO WZMACNIANEGO WŁÓKNAMI – SERIA 2

COMPOSITION OF THE FIBER REINFORCED CEMENTITIOUS COMPOSITE MIXTURE – VARIANT 2

Składnik / Constituent	Cement	Popiół lotny Fly ash	Piasek kwarcowy Quartz sand	Woda Water	Superplastyfikator Superplasticizer	Włókna polipropylenowe PP fibers	Włókna tekstylne Textile fibers
Udział / Ratio	1.0	1.2	0.8	0.52	0.033	1.5%	1%
Zawartość / Content, kg·m ⁻³	583	700	467	298	19	13.65	4.25

Tablica 3 / Table 3

SKŁAD KOMPOZYTU CEMENTOWEGO WZMACNIANEGO WŁÓKNAMI – SERIA 3

COMPOSITION OF THE FIBER REINFORCED CEMENTITIOUS COMPOSITE MIXTURE – VARIANT 3

Składnik / Constituent	Cement	Popiół lotny Fly ash	Piasek kwarcowy Quartz sand	Granulat gumowy Rubber	Woda Water	Superplastyfikator Superplasticizer	Włókna polipropylenowe PP fibres	Włókna tekstylne Textile fibers
Udział / Ratio	1.0	1.2	0.7	0.1	0.52	0.033	1.5%	1%
Zawartość / Content, kg·m ⁻³	583	700	467	58.5	298	19	13.65	4.25

Seria 3

Zastosowano takie same włókna jak w serii 2. Kruszywo, czyli piasek kwarcowy, częściowo zastąpiono granulatem gumowym; głównym składnikiem granulatu jest kauczuk butadienowo-styrenowy, o wymiarach nie przekraczających 1,0 mm. W trakcie przygotowania granulatu usunięto włókna tekstylne i kord metalowy. Skład mieszanki podano w tablicy 3.

Seria 4

W tej serii zastosowano wzmocnienie z włókien monofilamentowych Masterfiber 401, wykonanych z polialkoholu winylowego. Włókna miały długość 12 mm i średnicę od 0,16 mm do 0,24 mm oraz gęstość 1300 kg/m³. Skład mieszanki podano w tablicy 4.

Seria 5

Zastosowano takie same włókna jak w serii 4. Kruszywo częściowo zastąpiono tańszym materiałem wtórnym – pyłem skalnym, który jest produktem ubocznym mielenia i sortowania kruszywa w kamieniołomach. Pył skalny miał możliwie jak najmniejsze wymiary ziaren - mniejsze od 0,063 mm. Skład mieszanki podano w tablicy 5.

Tablica 4 / Table 4

SKŁAD KOMPOZYTU CEMENTOWEGO WZMACNIANEGO WŁÓKNAMI – SERIA 4

COMPOSITION OF THE FIBER REINFORCED CEMENTITIOUS COMPOSITE MIXTURE – VARIANT 4

Składnik / Constituent	Cement	Popiół lotny Fly ash	Piasek kwarcowy Quartz sand	Woda Water	Superplastyfikator Superplasticizer	Włókna z polialkoholu winylowego PVA fibers
Udział / Ratio	1.0	1.2	0.8	0.52	0.033	2%
Zawartość / Content, kg·m ⁻³	583	700	467	298	19	26

Variant 4

This variant has polyvinyl alcohol, monofilament fibers Masterfiber 401 as the hardening compound. The fibers have length 12 mm and diameter 0.16 - 0.24 mm and density 1300 kg/m³. The composition is in the Table 4.

Variant 5

The hardening element is the same as in variant 4. The aggregate is partially replaced by a cheaper secondary material – rock dust, a secondary product of milling and sorting in quarries. The rock dust has the smallest fraction possible – particle sizes below 0.063 mm. The composition is in the Table 5.

2.2. Preparation of a fresh fiber reinforced cementitious mixture

It is necessary to maintain a strict technological discipline when mixing a fiber reinforced cementitious composite, because lumps of unmixed components can occur in a denser concrete. We used a forced circulation mixer with 100 l volume, for mixing the mixtures.

Składnik / Constituent	Cement	Popiół lotny Fly ash	Pył skalny Rockdust	Piasek kwarcowy Quartz sand	Woda Water	Superplastyfikator Superplasticizer	Włókna z polialkoholu winylowego PVA fibers
Udział / Ratio	1.0	1.2	0.2	0.8	0.52	0.033	2%
Zawartość / Content, kg·m ⁻³	583	583	120	467	298	19	26

2.2. Przygotowanie mieszanek kompozytów cementowych, wzmacnianych włóknami

Podczas mieszania kompozytu cementowego, wzmacnianego włóknami, konieczne jest zachowanie ścisłych warunków technologicznych, ponieważ w gęstszym betonie mogą pojawiać się niepożądane grudki, niewymieszanych składników. Zastosowano mieszalnik z wymuszonym obiegiem, o objętości 100 litrów.

Proces mieszania był następujący (13): najpierw zważono składniki o udziałach podanych w tabeli 1. Następnie pierwszy składnik – piasek kwarcowy umieszczono w mieszalniku, dodano 95% wody oraz domieszkę – superplastyfikator. Składniki mieszano dwie minuty. Po tym czasie dodano popiół lotny, granulację gumową, pył skalny oraz cement portlandzki wraz z resztą wody i mieszano przez 5 minut. Na końcu dodano włókna i całość mieszano kolejne 5 minut. Składniki mieszano na wysokich obrotach.

2.3. Formowanie próbek i metody badawcze

Dla każdej z 5 serii kompozytów cementowych wzmacnianych włóknami przygotowano po 3 próbki do badania właściwości fizycznych i mechanicznych. Badania kompozytów wykonywano zgodnie z normami. Wytrzymałość na ściskanie oznaczano zgodnie z normą ČSN EN12390-3 Badania stwardniałego betonu – Część 3: Wytrzymałość na ściskanie próbek do badań (14), na maszynie wytrzymałościowej FORM + TEST Alpha 2-4000. Wytrzymałość na ściskanie badano na próbkach cylindrycznych o średnicy 150 mm i wysokości 300 mm. Probki cylindryczne umieszczano na prasie, na środku płyt dociskowych, prostopadle do kierunku formowania. Naprężenia ściskające, których przyrost wynosił 0,6 MPa/s, wzrastały aż do zniszczenia próbki.

Rejestrowano maksymalną siłę ściskającą, a wytrzymałość obliczano ze wzoru [1]:

$$f_c = \frac{F}{A} \quad [1]$$

gdzie: f_c – wytrzymałość na ściskanie [MPa], F – maksymalna siła ściskająca [N], A – powierzchnia ściskana próbki [mm²].

Badanie wytrzymałości na zginanie przeprowadzano zgodnie z normą ČSN EN12390-5 Badania betonu – Część 5: Wytrzymałość na zginanie próbek (15), na uniwersalnej maszynie wytrzymałościowej

The process of mixing was as follows (13): First, the components, as per Table 1 were weighed. Then the first component – quartz sand was put into the mixer and 95% of water and all the additives i.e. superplasticizers. Then these components were mixed for two minutes. Afterwards the fly ash was added, rubber granules, rock dust and the Portland cement, with the rest of the water. Additional mixing for 5 minutes and finally the fibers were added and all components were mixed for additional 5 minutes. All the mixing was done at high frequencies.

2.3. Casting specimens and testing methods

For each of 5 variants 3 samples of the fiber reinforced cementitious composite were made, for the evaluation of the physical and mechanical properties. The next part describes the testing of the fiber reinforced cementitious composite.

Compressive strength

The testing was made according to the standard ČSN EN12390-3 Testing of hardened concrete – Part 3: Compressive strength of the testing samples (14), on a testing equipment FORM + TEST Alpha 2-4000. Compressive strength was measured on a testing cylinder Ø 150, height 300 mm. The cylinders were put into the press, in the middle of the loading plates, perpendicularly to the filling direction. The cylinders were pressed with increase 0.6 MPa/s, until fracture.

The maximal pressure was noted and the strength calculated from equation [1]:

$$f_c = \frac{F}{A} \quad [1]$$

where: f_c – compressive strength [MPa], F – maximal pressure [N], A – loaded area [mm²].

Flexural strength

The testing was made according to the standard ČSN EN12390-5 Testing of hardened concrete – Part 5: Flexural strength of the testing samples (15), on a universal testing equipment EU 40. Flexural strength was measured on the testing bars: 100 x 100 x 400 mm. The bars were put into the press, perpendicularly to the filling direction. The bars were pressed in a four-point load with pressure increase 0.06 MPa/s, until fracture.

EU 40. Wytrzymałość oznaczano na belkach o wymiarach: 100 mm x 100 mm x 400 mm. Belki umieszczano w prasie prostopadle do kierunku formowania. Próbkę poddawano zginaniu czteropunktowemu, a naprężenia zginające przyrastały 0,06 MPa/s, aż do zniszczenia belek.

Rejestrowano maksymalne obciążenie, a wytrzymałość obliczano ze wzoru [2]:

$$f_{cf} = \frac{F \cdot l}{d_1 \cdot d_2^2} \quad [2]$$

gdzie: f_{cf} – wytrzymałość na zginanie [MPa], F – maksymalne obciążenie [N], l – rozstaw podpór [mm], d_1 i d_2 szerokość oraz wysokość przekroju poprzecznego próbki [mm].

Statyczny moduł sprężystości oznaczano zgodnie z normą ČSN ISO 1920-10 Badanie betonu – Część 10: Wyznaczanie statycznego modułu sprężystości przy ściskaniu (16). Stosowano maszynę wytrzymałościową FORM + TEST Alpha 3-3000S. Pomiary wykonywano na próbkach cylindrycznych, o wymiarach 150 mm x 300 mm. Próbkę umieszczano osiowo za pomocą czujników, na środku prasy. Próbkę okresowo obciążano stosując naprężenie pomiędzy podstawowym $\sigma_b = 0,5 \text{ N/mm}^2$, a jedną trzecią wytrzymałości betonu na ściskanie $\sigma_a = f_c / 3$. Przyrost obciążenia wynosił 0,6 N/mm² na sekundę, a nacisk trwał przez 60 s, dla poszczególnych poziomów naprężeń. W sposób ciągły rejestrowano wyniki pomiarów naprężenie-odkształcenie. Otrzymany moduł sprężystości obliczono na podstawie ostatniego cyklu.

Średnie względne odkształcenia ε_a i ε_b obliczano na podstawie wszystkich punktów w danym cyklu. Statyczny moduł sprężystości przy ściskaniu E_c – w niutonach na mm² określa się za pomocą następującego równania [3]:

$$E_c = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} = \frac{\sigma_a - \sigma_b}{\varepsilon_a - \varepsilon_b} \quad [3]$$

gdzie: σ_a to naprężenie maksymalne w N/mm² [$\sigma_a = f_c/3$], σ_b to naprężenie podstawowe [0,5 N/mm²], ε_a to średnie względne odkształcenie przy maksymalnym naprężeniu, ε_b średnie względne odkształcenie przy naprężeniu podstawowym.

Wynik zaokrąglano do najbliższych 500 N/mm², dla wartości przekraczających 10 000 N/mm² oraz do wartości najbliższej 100 N/mm², dla wartości mniejszych od 10 000 N/mm².

3. Wyniki i dyskusja

Podstawowe właściwości fizyczne badanych mieszanek „zielonego” kompozytu cementowego, wzmacnianego odkształceniowo włóknami, nazywanego „zielonym” ZKC, przedstawiono w tabeli 6.

3.1. Konsystencja

Badanie konsystencji wykonano na świeżych mieszankach, stosując metodę rozplywu stożka, a wyniki dla wszystkich serii mieściły się w zakresie 590 mm - 640 mm. Wartości te odpowiadają

The maximal pressure was noted and the strength calculated from equation [2]:

$$f_{cf} = \frac{F \cdot l}{d_1 \cdot d_2^2} \quad [2]$$

where: f_{cf} – flexural strength [MPa], F – maximal pressure [N], l – distance between supporting cylinders [mm], d_1 and d_2 cross-section dimension of the block [mm].

Static elastic modulus measurement

The testing was made according to the standard ČSN ISO 1920-10 Testing of concrete – Part 10: Determination of static modulus of elasticity in compression (16), on a testing equipment FORM + TEST Alpha 3-3000S. Static modulus was measured on a cylindrical block 150 x 300 mm. The blocks were axially mounted with sensors and were put into the middle of the testing press. The testing blocks were periodically stressed with values between the basic stress $\sigma_b = 0.5 \text{ N/mm}^2$ and one third of a concrete compressive strength $\sigma_a = f_c / 3$. The increment was 0.6 N/mm² per second and kept at 60 s for the individual stress levels. The measurements = stress and strain, were continuously recorded. The resulting modulus was calculated from the last cycle.

Calculation and expression of the results

The average relative strain ε_a and ε_b are calculated from all measured spots in the respective cycle. The static modulus of elasticity in compression E_c – in Newtons per mm² is defined according to the formula [3]:

$$E_c = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} = \frac{\sigma_a - \sigma_b}{\varepsilon_a - \varepsilon_b} \quad [3]$$

where: σ_a is the maximal stress load in N/mm² ($\sigma_a = f_c/3$), σ_b basic stress (0.5 N/mm²),

ε_a average relative strain under the maximal stress, ε_b average relative strain under the basic stress.

The result is rounded to the closest 500 N/mm² with values exceeding 10 000 N/mm² and to the nearest 100 N/mm² for values less than 10 000 N/mm².

3. Results and discussion

The basic physical and mechanical properties of the experimental mixture of the green fiber reinforced cementitious composite with strain hardening, called Green ECC (G-ECC) are presented in the Table 6.

3.1. Flowability

After mixing the fresh composite constituents, the slump flow is tested and the consistency of all the variants was 590 – 640 mm. These are values for very soft mixture, class F4 with slump flow 550 ± 100 mm and density 2000 ± 50 kg/m³.

Table 6 / Table 6

PODSTAWOWE WŁAŚCIWOŚCI FIZYCZNE I MECHANICZNE BADANYCH MIESZANEK „ZIELONEGO” KOMPOZYTU CEMENTOWEGO WZMACNIANEGO ODKSZTAŁCENIOWO WŁÓKNAMI

BASIC PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF THE EXPERIMENTAL MIXTURE OF THE GREEN FIBER REINFORCED CEMENTITIOUS COMPOSITE

Oznaczenie Label	Wytrzymałość na ściskanie Compressive strength, MPa	Wytrzymałość na zginanie Flexural strength, MPa	Odkształcenie graniczne Limiting strain, %	Moduł Younga Young's modulus, GPa	Gęstość Density, kg.m ⁻³
Seria 1 Variant 1	82.27	8.9	3.5	27.33	2049
Seria 2 Variant 2	72.18	9.35	3.1	26.18	2044
Seria 3 Variant 3	55.17	7.44	2.2	21.11	2038
Seria 4 Variant 4	87.76	8.77	3.6	26.8	2049
Seria 5 Variant 5	78.87	8.32	2.8	25.8	2044

mieszance ciekłej klasy F4 o rozplywie stożka 550 ± 100 mm oraz gęstości 2000 ± 50 kg/m³.

3.2. Wytrzymałość na ściskanie

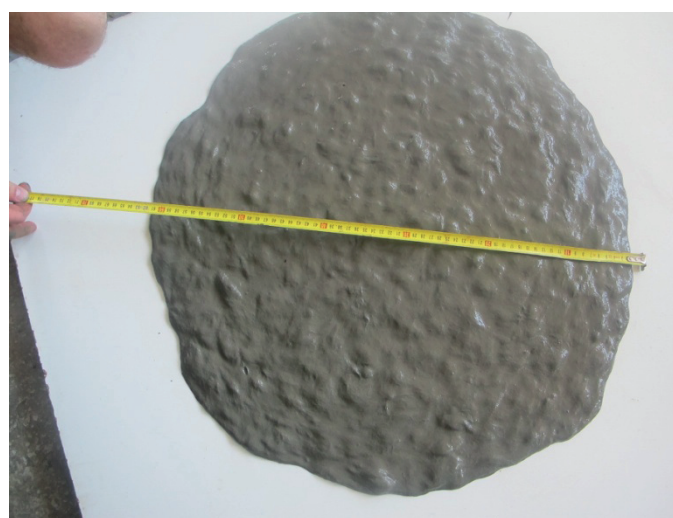
Wytrzymałość na ściskanie po 28 dniach twardnienia pokazano na rysunku 3. Wynika z nich, że kompozyty referencyjne z serii 1 i 4, nie zawierające składników wtórnych, mają największą wytrzymałość. Betony z dodatkiem materiałów wtórnych mają mniejszą wytrzymałość na ściskanie o około 10% - 20%. Wyjątkiem jest seria 3 z dodatkiem granulatu gumowego, w przypadku której wytrzymałość na ściskanie jest znacznie mniejsza, o około jedną trzecią, od betonu referencyjnego.

3.3. Zależność naprężenie-odkształcenie oraz moduł sprężystości

Moduł sprężystości rośnie ze wzrostem wytrzymałości. Moduł ten jest mniejszy niż w przypadku zwykłego betonu, z uwagi na brak kruszywa grubego, w badanych kompozytach.

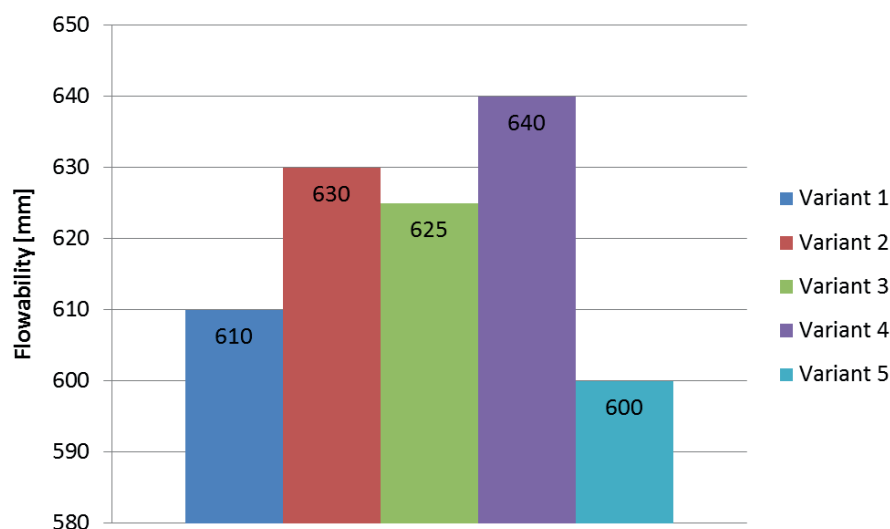
Jak pokazano na rysunkach 4 i 5, w kompozytach ZKC po wystąpieniu pierwszych spękań następuje wzmocnienie kompozytu, to znaczy naprężenie rośnie wraz z odkształceniem, aż do granicy wytrzymałości. Schemat roboczy pasuje do mieszanki referencyjnej, opartej na składzie M45 (4). Kompozyt zachowuje się w pierwszej fazie jak beton o normalnej wytrzymałości, a w drugiej fazie bardziej jak metal, gdy pojawiają się spękania po osiągnięciu granicy plastyczności w pierwszej fazie.

Odkształcenie graniczne poszczególnych próbek mieści się w zakresie 2,2% – 3,6%. Próbki referencyjne osiągnęły większe wartości, natomiast kompozyt z dodatkiem granulatu gumowego mniejsze.



Rys. 1. Badanie konsystencji metodą rozplywu stożka

Fig. 1. Measuring of the consistency in slump flow test



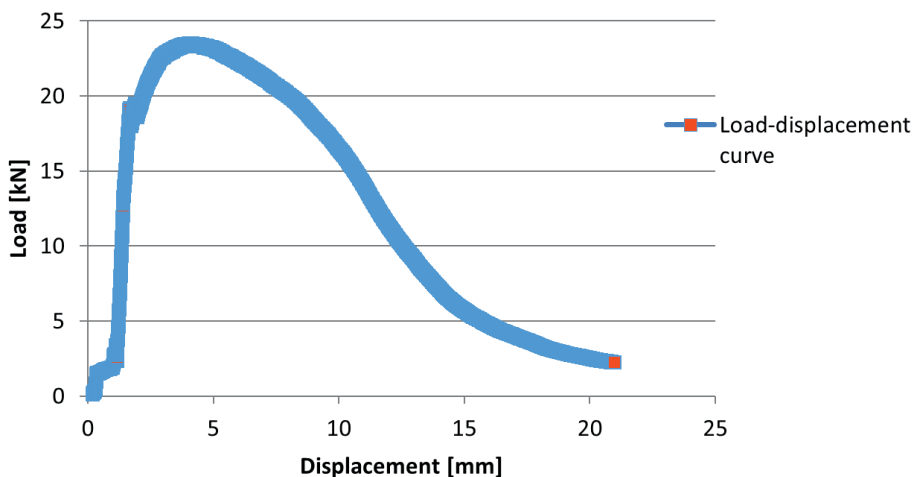
Rys. 2. Wyniki badania metodą rozplywu stożka

Fig. 2. Results of the slump flow tests

4. Wnioski

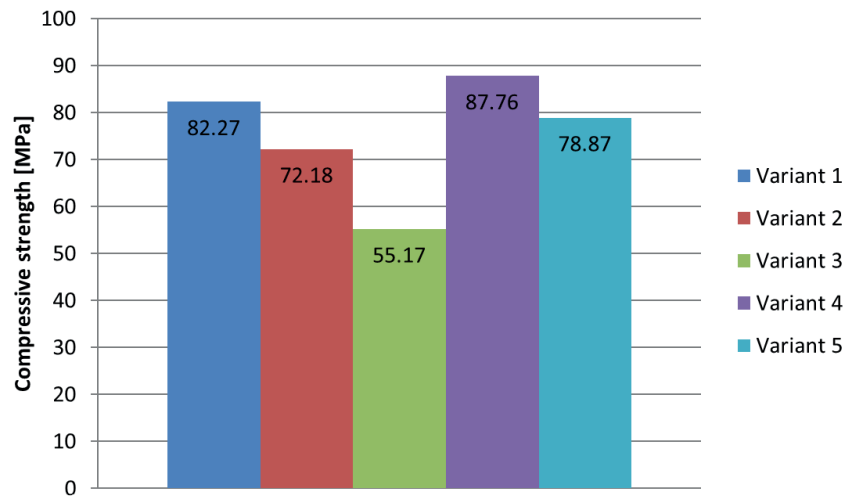
Na podstawie uzyskanych wyników i wykresów możemy ocenić pewne kierunki, które są wspólne dla zbadanych serii kompozytów, z przemysłowymi produktami ubocznymi. Zastosowanie dodatków wtórnych pogarsza właściwości fizyczne i mechaniczne kompozytów. Jest to spowodowane niedostatecznym efektem synergicznym włókien z matrycą cementową oraz na granicy pomiędzy tymi materiałami. W przypadku serii 3 z włóknami polipropylenowymi, częściowo zastąpionymi włóknami tekstylnymi, oraz piaskiem kwarcowym częściowo zastąpionym granulatem gumowym, właściwości kompozytu są zdecydowanie gorsze. Granulat gumowy jest nieodpowiednim materiałem do stosowania w kompozytach cementowych z włóknami. W seriach 2 – z włóknami tekstylnymi i 5 – z pyłem skalnym, wyniki są satysfakcjonujące, porównując je do wyników dla serii referencyjnych. Uzyskana wytrzymałość na ściskanie mieści się w górnej granicy 20 MPa – 95 MPa (4), a naprężenie graniczne w jednej trzeciej: 1%–8%. W tabelicy 7 podsumowano uzyskane wyniki.

Beton jest najczęściej stosowanym materiałem sztucznym. Systematyczna ocena, a także projektowanie materiałów, które mają mniejszy wpływ na środowisko naturalne dzięki zastosowaniu dodatków wtórnych, jest strategią na rzecz zrównoważonego rozwoju. Celem badań było opracowanie mieszanki o korzystnym składzie, przy wykorzystaniu materiałów



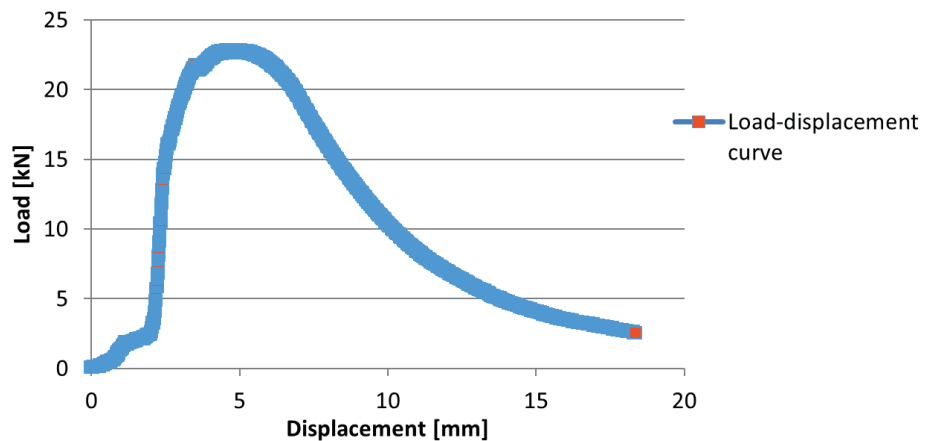
Rys. 5. Krzywa siła – odkształcenie kompozytu cementowego wzmocnianego włóknami – seria 2

Fig. 5: Work diagram of the fiber reinforced cementitious composite, variant 2



Rys. 3. Wytrzymałość na ściskanie po 28 dniach

Fig. 3. Compressive strength results after 28 days



Rys. 4. Krzywa siła – odkształcenie kompozytu cementowego wzmocnianego włóknami – seria 1

Fig. 4. Working diagram of the fiber reinforced cementitious composite – variant 1

3.2. Compressive strength

Compressive strength results after 28 days are presented in Fig. 3. As it is evident from the results, the variants 1 and 4, reference mixtures without secondary components have the highest compressive strength. The mixtures with the secondary components have lower compressive strength, by about 10 - 20%. The exception is the variant 3 with the rubber granules, whose compressive strength is much lower, by about a third, from the reference mixture.

3.3. Stress-strain response and elastic modulus

It is apparent, that the modulus increases with the increasing strength. The modulus is

wtórnych, w oparciu o wcześniej podane proporcje mieszanki, która będzie stosowana jako bardziej ekonomiczny i ekologiczny „zielony” kompozyt cementowy, wzmocniony włóknami. Innym celem było zbadanie takiego kompozytu pod kątem wzmacniania odkształceniowego, a w szczególności wiązań mikromechanicznych matrycy cementowej z włóknami hybrydowymi oraz na granicy pomiędzy nimi, a także zachowania kompozytów po zniszczeniu, czyli z punktu widzenia mechaniki pękania.

Tablica 7 / Table 7

POTENCJALNE MATERIAŁY ZASTĘPCZE ORAZ WSTĘPNE WYNIKI OCENY

POTENTIAL SUBSTITUTE MATERIALS AND PRELIMINARY EVALUATION RESULTS

Material / Material	Material zastępowany / Substituting material	Wynik / Outcome
Włókna tekstylne / Textile fibers	Włókna / Fibers	Pozytywny / Passed
Granulat gumowy / Rubber granulate	Piasek / Sand	Negatywny / Failed
Pył skalny / Rock flour	Popiół lotny / Fly ash	Pozytywny / Passed

Podziękowania

Wsparcie finansowe badań przeprowadzonych w ramach koncepcyjnych prac badawczych, rozwojowych i innowacji w 2015 prowadzonych przez VSB-TU w Ostrawie, uzyskano z Ministerstwa Szkolnictwa, Młodzieży i Sportu Republiki Czeskiej

Literatura / References

1. V. C. Li et al., Development of green ECC for sustainable infrastructure systems, In Proceedings of the International Workshop on Sustainable Development and Concrete Technology, May 20–21, Beijing, China 2004, K. Wang, Ed., pp. 181–192.
2. M. Lepech, V. C. Li, Sustainable Pavement Overlays Using Engineered Cementitious Composites, International Journal of Pavement Research and Technology, pp. 241-250 (2010).
3. J. Kolísko. Vliv krátkých všesměrně rozptýlených polypropylénových mikro a makrovláken na vlastnosti cementových malt a betonů, Praha : ČVUT, 2008. P. 24, ISBN 978-80-01-04072-0.
4. V. C. Li, Concrete Construction Engineering Handbook, Second Edition. Rutgers University, Piscataway, New Jersey, USA. Boca Raton: CRC Press, 2008. Engineered Cementitious Composite (ECC): Material, Structural, and Durability Performance, p. 1024-1069. ISBN 9780849374920.
5. G. Fischer, V. C. Li, Deformation behavior of fiber-reinforced polymer reinforced engineered cementitious composite (ECC) flexural members under reversed cyclic loading conditions, ACI Structural Journal, **100**, 1, 25–35, (2003).
6. Z. Zhigang, Z. Qian, Q. Shunzhi, V. C. Li, Development of a Low E-modulus Early Strength ECC for Ultra-thin White Topping Overlay, Proceedings of Transportation Research Board, 94th Annualmeeting, Washington D.C., U.S., January 11-15, 2015, paper No. 15-3158.
7. S. H. Said, H. A. Razak, I. Othman, Flexural behavior of engineered cementitious composite (ECC) slabs with polyvinyl alcohol fibers, Constr. Build. Mat., **75**, 30, 176–188 (2015).
8. V. C. Li, Integrated structures and materials design, RILEM J. Mater. Struct., **40**, 4, 387–396 (2006).
9. J. Yu, Z. Zhang, V. C. Li, Mechanical performance of ECC with high-volume fly ash after sub-elevated temperatures, J. Constr. Build. Mat., **99**, 82-89 (2015).
10. EN 197-1. Cement - Part 1: Composition, specifications and conformity criteria for common cements. Prague: Czech Standards Institute, 2000.
11. ČSN EN 450-1. Fly ash for concrete - Part 1: Definition, specifications and conformity criteria. Prague: Czech Standards Institute, 2008.

lower than for normal concrete, due to missing fraction of coarse aggregates.

As shown in Figs. 4 and 5, the composite material ECC hardens after a first crack appears, i.e. the stress increases with the strain, until the strength limit. The working diagram matches the composite mixture based on the M45 composition (4). The composite behaves in the first phase as a concrete with a normal strength, in the second phase more as metal, when after reaching the yield point in the first phase the fractures appear.

The limiting strain for individual samples is in the range 2.2 – 3.6 %. Reference mixtures have higher values, while the sample with rubber granules has the lowest.

4. Conclusions and outlook

From the results and graphs, we can evaluate certain trends that are common for the variants with industrial by-products. The use of secondary constituents worsens the physical and mechanical properties of the composite. The difference is caused by an insufficient synergic interaction between the fibers, composite matrix and materials boundaries. This is obvious for the variant 3 – PP fibers partially replaced by textile fibers and the quartz sand by rubber granules, where the properties are distinctly worse. The rubber granules are an unsuitable material to use in fiber-cement composites. Variants 2 – textile fibers and 5 – rock dust are satisfactory, compared to the reference testing variants. The resulting compressive strength is in the upper limit 20 - 95 MPa (4) and the limiting strain is in the third of the limit : 1 - 8%. Table 7 summarizes the obtained results.

Concrete is the most used artificial material. Having a frame for a systematic evaluation and design of materials that have lesser environmental impact due to the use of secondary materials, is a strategy for sustainable development. The research aim is finding an optimal mixture using secondary materials, based on the mentioned ratios, which will be used as more economical and ecological “green” fiber reinforced cementitious composite. Another aim is testing the “green” fiber reinforced cementitious composite with strain hardening, especially the micromechanical bonds between the cement matrix, hybrid fibers and their boundaries and behavior of the composites when damaged i.e. breaking mechanics.

12. ASTM C494. Standard Specification for Chemical Admixtures for Concrete.
13. Kajima Technical Research Institute. 2006. Mixing Manual of ECC Dry-Mix for Casting, KaTRI, Japan. 2006.
14. ČSN EN 12390-3 Testing hardened concrete – Part 3: Compressive strength of test specimens. Prague: Czech Standards Institute, 2009.
15. ČSN EN 12390-Testing hardened concrete – Part 5: Flexural strength of test specimens. Prague: Czech Standards Institute, 2009.
16. ČSN ISO 1920-10 Testing of concrete – Part 10: Determination of static modulus of elasticity in compression. Prague: Czech Standards Institute, 2015.

Acknowledgements

The works were supported from funds for conceptual development of research, development and innovations for 2015 at the VSB-TU of Ostrava which were obtained from the Ministry of Education, Youths and Sports of the Czech Republic.