

dr inż. Iga Jasińska^{1)*}

ORCID 0000-0003-3990-7497

dr hab. inż. Ryszard Dachowski, prof. URad¹⁾

ORCID: 0000-0002-4412-7703

dr inż. Monika Jaworska-Wędzińska¹⁾

ORCID: 0000-0002-4380-9155

The effect of glass fibers on selected properties of autoclaved sand-lime materials

Wpływ włókien szklanych na wybrane właściwości autoklawizowanych materiałów wapienno-piaskowych

DOI: 10.15199/33.2024.09.04

Abstract. The aim of the study was to determine the effect of zirconia-coated (AR) glass fibers, with a length of 24 mm, on selected properties of autoclaved lime-sand samples, such as density, water absorption, and compressive strength. Microstructure observations were also conducted using SEM. The research was carried out using fibers with a mass content ranging from 1% to 5%. The obtained results provided the basis for concluding that samples containing 1 – 3% zirconia-coated glass fibers by mass exhibit higher compressive strength compared to the reference samples, and they indicate the direction for further research.

Keywords: sand-lime samples; zirconia-coated glass fibers; density; water absorption; compressive strength; microstructure; SEM

Streszczenie. Celem badań było określenie wpływu zawartości włókien szklanych z powłoką cyrkonową (AR) o długości 24 mm, na wybrane właściwości autoklawizowanych próbek wapienno-piaskowych, tj. gęstość, absorpcja wody i wytrzymałość na ściskanie, wykonanych na bazie mieszanki wapienno-piaskowej. Dokonano również obserwacji mikrostruktury za pomocą SEM. Badania przeprowadzono z użyciem włókien, których udział w masie wynosił od 1 do 5%. Otrzymane wyniki badań dały podstawę do stwierdzenia, że próbki zawierające w masie 1 – 3% włókien szklanych z powłoką cyrkonową wykazują wyższą wytrzymałość na ściskanie w odniesieniu do próbek referencyjnych, oraz wskazują kierunek dalszych badań.

Słowa kluczowe: próbki wapienno-piaskowe; włókna szklane z powłoką cyrkonową; gęstość, absorpcja; wytrzymałość na ściskanie; mikrostruktura, SEM.

Sand-lime products, also known as silicate products, are made exclusively from natural raw materials (sand, lime, and water) through an autoclaving process. They are particularly offered on the market as masonry elements. Research on modifying the composition of these materials is not as widespread as it is for cement composites, such as mortars and concretes. Studies on silicate materials primarily focus on increasing their density to improve acoustic insulation [1] or thermal insulation properties [2]. Both mineral raw materials and recycled products have been used in experiments [3 – 4]. The use of various types of fibers (glass, carbon, basalt, polypropylene, etc.) in autoclaved aerated concrete is well-known [5, 6]. The analyzed literature indicates that these fibers significantly enhance compressive and flexural strength. However, there are no documented studies in the scientific literature on the use of zirconia-coated glass fibers in autoclaved sand-lime materials. The presented research results, therefore, represent a novel scientific solution.

Glass fibers used in concrete production as dispersed reinforcement are products derived from post-consumer white glass recycling, making them an attractive option in terms of sustainable waste utilization. At the same time, they retain the valuable mechanical properties characteristic of glass [7]. The

Wyroby wapienno-piaskowe, zwane również silikatowymi, to produkty wykonane wyłącznie z surowców naturalnych (piasku, wapna i wody) w procesie autoklawizacji. Na rynku oferowane są one szczególnie w postaci elementów murowych. Badania nad modyfikacją składu tych materiałów nie są tak powszechne, jak badania kompozytów cementowych, tj. zapraw i betonów. Znane są badania materiałów wapienno-piaskowych polegające przede wszystkim na zwiększeniu ich gęstości w celu poprawy izolacyjności akustycznej [1] czy cech termoizolacyjnych [2]. W doświadczeniach wykorzystywano zarówno surowce mineralne, jak i produkty pochodzące z recyklingu [3 – 6]. Znane jest wykorzystanie różnych rodzajów włókien, m.in. szklanych, węglowych, bazaltowych, polipropylenowych [5, 6]. Z analizowanej literatury wynika, że mają one duży wpływ na zwiększenie wytrzymałości na ściskanie i zginanie. W literaturze naukowej nie opisano wyników badań z wykorzystaniem włókien szklanych z powłoką cyrkonową w autoklawizowanych materiałach wapienno-piaskowych. Przedstawione wyniki badań stanowią zatem nowe rozwiązanie naukowe.

Włókna szklane stosowane w produkcji betonów jako zbrojenie rozproszone są produktami pochodzącymi z recyklingu użytkowego szkła białego, a więc są atrakcyjne pod względem zrównoważonego wykorzystania odpadów. Jednocześnie zachowują cenne właściwości mechaniczne charakterystyczne dla szkła [7]. Obecność włókien w istotny sposób wpływa

¹⁾ Uniwersytet Radomski im. Kazimierza Pułaskiego, Wydział Mechaniczny

* Correspondence address: i.jasinska@urad.edu.pl

presence of fibers significantly influences the inhibition of micro- and macro-cracking processes in cement composites, both during the setting and curing stages, as well as under operational loads [8].

According to published scientific studies, mortar samples reinforced with glass fibers in amounts ranging from 1 – 5% exhibit an improvement in the mechanical properties of the resulting products, including compressive strength, flexural strength, and modulus of elasticity [9, 10]. However, studies conducted on concrete samples with the same type of cement binder have shown that an increasing proportion of glass fibers leads to a reduction in mechanical strength due to poor aggregate bonding. Additionally, research indicates that further increases in fiber content in mortars [11] and concretes [12] result in a decrease in compressive strength.

There are many types of glass fibers, most of which are general-purpose products that do not stand out in terms of specific mechanical properties or chemical resistance (E-type fibers) [13]. The alkali resistance of fibers can be enhanced during production by applying active mineral additives and special coatings [14], most commonly made from zirconium oxide. By creating a thin layer rich in this oxide on the surface of the fibers, the diffusion of OH⁻ ions is significantly limited, preventing corrosion of the glass matrix.

Research

The aim of the study was to determine the effect of zirconia-coated glass fibers on selected properties of sand-lime samples produced through the autoclaving process. **The scope of the research** included the analysis of density, water absorption, and compressive strength of both reference samples and those modified with glass fibers. Additionally, microstructure observations were conducted on the samples using scanning electron microscopy (SEM)

Materials and samples. For the study, samples in the form of beams with dimensions of 40×40×160 mm were prepared. The reference samples were made from a silicate (sand-lime) mixture, consisting of sand (92%) and hydrated lime (8%). The molar ratio of the starting material was CaO/SiO₂ (C/S) = 0.09. The characteristics of the quicklime used in the research are presented in Table 1.

The sand used in the study consists of grains with diameters ranging from 0.063 to 1.0 mm and is classified as medium sand (MSa), with a median grain diameter (d_{50}) of 0.31 mm. To prepare the reference samples, the sand-lime mixture was mixed with water at 6% by weight relative to the total mass of the mixture. The resulting mass was molded into beams, pressed with a force of 20 MPa, and subjected to autoclaving at 203°C for 8 hours. To determine the properties of the modified samples, a research plan was devised using a full one-factor experiment 5^k (with k = 1). The production of test samples involved replacing 1 – 5% of the sand-lime mixture mass with glass fibers, with measurement increments of 1%. The

przede wszystkim na hamowanie procesów mikro- i makroskopia kompozytów cementowych, zarówno na etapie ich wiązania, jak i dojrzewania, a także pod działaniem obciążeń eksploatacyjnych [8].

Z opublikowanych w literaturze badań naukowych wynika, że próbki zapraw wzmocniane włóknem szklanym w ilości 1 – 5% cechuje wzrost cech mechanicznych otrzymanych z nich produktów, w tym wytrzymałości na ściskanie, zginanie czy modułu sprężystości [9, 10]. W badaniach wykonanych na próbkach betonowych o tym samym rodzaju spoiwa cementowego wykazano natomiast, że zwiększający się udział włókien szklanych wpływa na zmniejszenie wytrzymałości mechanicznej ze względu na słabą przyczepność kruzyw. Jednocześnie badania pokazują, że dalsze zwiększanie udziału włókien w masie zapraw [11] oraz betonów [12] wpływa na zmniejszenie wytrzymałości na ściskanie.

Istnieje wiele rodzajów włókien szklanych, z których większość to produkty ogólnego zastosowania niewyróżniające się szczególnymi właściwościami mechanicznymi ani odpornością chemiczną (włókna typu E) [13]. Odporność alkaliczna włókien może zostać zwiększona na etapie produkcji przez zastosowanie na ich powierzchni aktywnych dodatków mineralnych oraz specjalnych powłok [14], najczęściej z tlenku cyrkonu. Dzięki utworzeniu cienkiej warstwy bogatej w ten tlenek na powierzchni włókien, dyfuzja jonów OH⁻ jest znacznie ograniczona i nie dochodzi do korozji masy szklanej.

Badania

Celem badań było określenie wpływu włókien szklanych z powłoką cyrkonową na wybrane właściwości próbek wapienno-piaskowych wytwarzanych w procesie autoklawizacji. **Zakres badań** obejmował gęstość, absorpcję wody oraz wytrzymałość na ściskanie próbek referencyjnych i modyfikowanych włóknami szklanymi. Wykonano również obserwację mikrostruktury w próbkach za pomocą mikroskopii skaningowej (SEM).

Materiały i próbki. Do przeprowadzenia badań przygotowano próbki w postaci beleczek o wymiarach 40×40×160 mm. Próbki referencyjne wykonano z mieszanki silikatowej (wapienno-piaskowej), składającej się z piasku (92%) i wapna hydratyzowanego (8%). Stosunek molowy masy wyjściowej wynosi CaO/SiO₂ (C/S) = 0,09. Charakterystykę wapna palonego wykorzystanego w badaniach przedstawiono w tabeli 1.

Wykorzystany w badaniach piasek składa się ziaren o średnicy 0,063 ÷ 1,0 mm i zaliczany jest do piasków średnich (MSa), w przypadku których średnica zastępcza d_{50} wynosi 0,31 mm. W celu wykonania próbek referencyjnych mieszankę wapienno-piaskową zarobiono wodą w ilości 6% wag. w stosunku do masy mieszanki. Tak powstałą masę uformowano w beleczki, sprasowano siłą 20 MPa i poddano autoklawizacji w temperaturze 203°C przez 8 h. W celu określenia właściwości próbek modyfikowanych przygotowano plan badań, wykorzystując pełny eksperyment 1-czynnikowy 5^k (przy k = 1). Wykonanie próbek badawczych polegało zatem na zastąpieniu 1 – 5% masy wapienno-piaskowej włóknami szklanymi z krokiem po-

Table 1. Characteristics of burned lime
Tabela 1. Charakterystyka wapna hydratyzowanego

CaO + MgO [%]	MgO [%]	CO ₂ [%]	SO ₃ [%]
94,72	0,97	1,47	0,18

prepared mass was molded into rectangular beams and subjected to the same autoclaving process as the reference samples.

The study utilized zirconia-coated (AR) glass fibers, which exhibit high chemical resistance in an alkaline environment due to their high zirconium oxide content (minimum 16%) and titanium oxide. These fibers have a diameter of 13 – 15 μm, a length of 24 mm, and a smooth surface, arranged in dense parallel bundles (Figure 1), with a density of 2500 – 2600 kg/m³. The results of the EDS analysis are presented in Table 2. The graphical representation of the EDS spectrum is shown in Figure 1c.

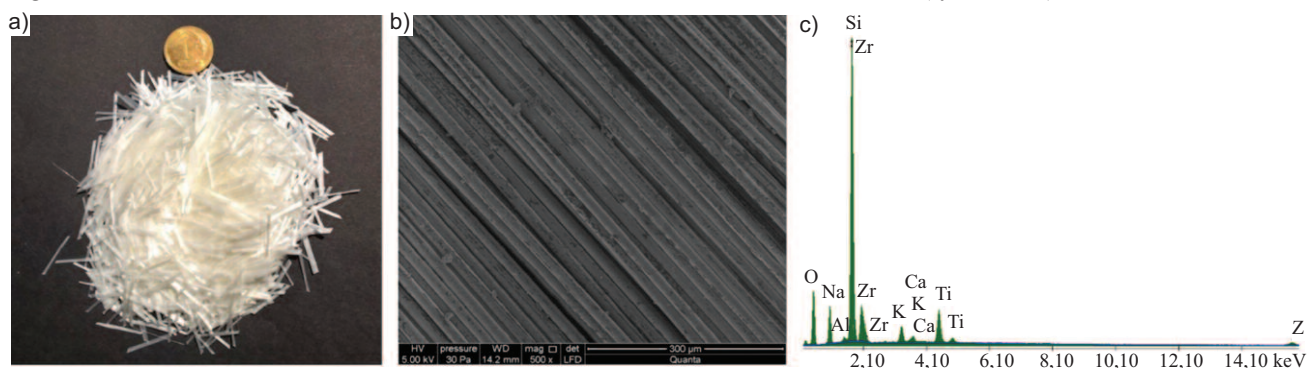


Fig. 1. Zirconia-coated glass fiber: a) illustrative photo; b) SEM image at 500× magnification; c) EDS spectrum
 Rys. 1. Włókna szklane z powłoką cyrkonową: a) zdjęcie poglądowe; b) zdjęcie SEM w powiększeniu 500×; c) widmo EDS

Research methods. Before testing, the samples were seasoned to an air-dry state for 14 days at a temperature of 18°C and relative humidity of 60 – 65%, in accordance with the requirements of PN-EN 772-1:11. The temperature and humidity conditions were continuously monitored using a measurement system.

The bulk density test was conducted according to the PN-EN 772-13:2001 standard. Before starting the test, any unnecessary material elements resulting from the manufacturing process were removed. **Water absorption testing** was performed following the guidelines of PN-EN 771-2 and PN-EN 772-21 standards. Both the density and water absorption tests were conducted with five repetitions, meaning six samples of the same composition were tested. The arithmetic mean of the obtained values was taken as the result.

The compressive strength test was conducted on dry reference samples and samples modified with fibers, measuring 40×40×160 mm. Samples with a face area of 40×160 mm were placed on the platen of a strength testing machine, aligned with the center of the platen (measuring 62.5×40.0 mm), and then compressed uniformly until the sample failed. The compressive strength test was performed on three samples of the same composition, and the arithmetic mean of the test results was recorded as the final result.

Microstructure observation was carried out using a scanning electron microscope (SEM). The examination was performed on fractured sections of sand-lime samples modified with 1% glass fibers.

Table 2. EDS analysis of zirconia-coated glass fiber

Tabela 2. Analiza EDS włókna szklanego z powłoką cyrkonową

Chemical elements content/ Zawartość pierwiastków [%]							
O	Na	Al	Si	K	Ca	Ti	Zr
27,42	8,35	0,70	35,26	2,90	1,11	7,32	16,94

miarowym co 1%. Tak przygotowaną masę uformowano w prostopadłościennych beleczki i poddano procesowi autoklawizacji w warunkach identycznych jak w przypadku próbek referencyjnych.

W badaniach wykorzystano włókna szklane z powłoką cyrkonową (AR), charakteryzującą się dużą odpornością chemiczną w środowisku alkalicznym, dzięki dużej zawartości tlenku cyrkonu (min. 16%) oraz tlenku tytanu. Są to włókna o średnicy 13 – 15 μm i długości 24 mm, z gładką powierzchnią, gęsto ułożone w równoległe pakiety (rysunek 1), których gęstość wynosi 2500 – 2600 kg/m³. Wyniki analizy EDS podano w tabeli 2. Graficzne odwzorowanie przedstawia obraz widma EDS (rysunek 1c).

Metody badań. Przed rozpoczęciem badań próbki były sezonowane do stanu powietrzno-suchego przez 14 dni w temperaturze 18°C i wilgotności względnej 60 – 65%, zgodnie z wymaganiami PN-EN 772-1:11. Warunki ciepło-wilgotnościowe były stale monitorowane przez zestaw pomiarowy.

Badanie gęstości objętościowej przeprowadzono zgodnie z normą 772-13:2001. **Badanie absorpcji wody** wykonano zgodnie z wytycznymi zawartymi w normach PN-EN 771-2 oraz PN-EN 772-21. Zarówno badanie gęstości, jak i absorpcji wody było przeprowadzane z pięciokrotnym powtórzeniem, czyli na sześciu próbkach o takim samym składzie. Jako wynik przyjęto średnią arytmetyczną z obliczonych wartości.

Badanie wytrzymałości na ściskanie zostało przeprowadzone na suchych próbkach referencyjnych oraz próbkach modyfikowanych włóknami o wymiarach 40×40×160 mm. Próbki o powierzchni licowej 40×160 mm zostały umieszczone na płycie maszyny wytrzymałościowej, współosiowo ze środkiem przebiegu płyty dociskowej w wymiarach 62,5×40,0 mm, a następnie ściskane w sposób jednostajny do zniszczenia próbki. Badanie wytrzymałości na ściskanie było przeprowadzane z dwukrotnym powtórzeniem, czyli na trzech próbkach o takim samym składzie i jako wynik przyjęto średnią arytmetyczną z badań.

Obserwację mikrostruktury wykonano na przełamach modyfikowanych próbek wapienno-piaskowych, zawierających 1% włókien szklanych.

Analysis of Research Results

Based on the obtained research results, it was determined that as the fiber content increases, the density of the modified samples decreases. With 5% glass fiber content, the samples achieved an average density of 1497 kg/m³, which is 85.9% of the density of the reference samples.

The shape and form of the curve describing the relationship between density and the glass fiber content in the samples (zirconia-coated fibers with a diameter of up to 15 μm and a length of 24 mm) were determined based on the obtained results. The density results for the reference samples and the sand-lime samples modified with zirconia-coated glass fibers in amounts of 1 – 5% by mass are presented in Figure 2.

Based on the obtained research results, it was concluded that as the fiber content increases, the water absorption in the prepared samples also increases. With 5% glass fiber content, the samples reached an average water absorption value of 19.07 kg/m³, representing a 45.3% increase compared to the water absorption in the reference samples. The water absorption results for the reference samples and the sand-lime samples modified with zirconia-coated glass fibers in amounts of 1 – 5% by mass are presented in Figure 3.

The results of the compressive strength tests, conducted on both reference samples and those containing glass fibers by mass (Figure 4), showed that with 1% fiber content, the compressive strength increases to an average value of 24.2 MPa, representing an increase of over 17% compared to the reference samples.

Further attempts to modify the samples by increasing the amount of zirconia-coated glass fibers resulted in compressive strengths that were higher than the reference samples, but lower than the sample containing 1% fibers. The compressive strength of samples with 2% fiber content was 13.6% higher than the reference samples, while the strength of samples with 3% fiber content was 1.4% higher. However, increasing the fiber content beyond this point led to a decrease in compressive strength compared to the reference samples. A fiber content of 4% resulted in a reduction in compressive strength by approximately 30% relative to the reference sample (14.46 MPa). With 5% glass fiber content, the modified samples achieved an average compressive strength of 9.03 MPa, which is 43.8% of the value of this parameter in relation to the reference samples.

Analiza wyników badań

Na podstawie otrzymanych wyników badań stwierdzono, że wraz ze wzrastającym udziałem włókien, gęstość modyfikowanych próbek ulega zmniejszeniu. Przy zawartości 5% włókien szklanych próbki uzyskały średnią wartość gęstości 1497 kg/m³, co stanowi 85,9% gęstości próbek referencyjnych.

W przypadku otrzymanych wyników badań określono kształt i postać krzywej opisującej zależność między gęstością a udziałem w masie próbek włókien szklanych z powłoką cyrkonową o średnicy do 15 μm i długości 24 mm. Wyniki badania gęstości określonej na próbkach referencyjnych i próbkach wapienno-piaskowych modyfikowanych włóknami szklanymi z powłoką cyrkonową w ilości 1 – 5% w masie próbki przedstawiono na rysunku 2.

Na podstawie otrzymanych wyników badań stwierdzono, że wraz ze wzrastającym udziałem włókien zwiększa się **absorpcja wody** w przygotowanych próbkach. Przy udziale 5% włókien szklanych próbki uzyskują średnią wartość absorpcji wynoszącą 19,07 kg/m³, co oznacza, że zwiększyła się ona o 45,3% w porównaniu z absorpcją wody w próbkach referencyjnych.

Wyniki badania absorpcji wody w przypadku próbek referencyjnych i wapienno-piaskowych modyfikowanych włóknami szklanymi z powłoką cyrkonową w ilości 1 – 5% w masie próbki przedstawiono na rysunku 3.

Wyniki badań wytrzymałości na ściskanie, przeprowadzonych na próbkach referencyjnych i zawierających włókna szklane w masie (rysunek 4), wykazały, że przy zawartości włókien w masie próbek w ilości 1%, wytrzymałość na ściskanie zwiększa się do średniej wartości 24,2 MPa, co oznacza wzrost wytrzymałości o ponad 17% w porównaniu z próbkami referencyjnymi.

Dalsze próby modyfikacji polegające na zwiększeniu udziału włókien szklanych z powłoką cyrkonową w masie próbek powodują, że ich wytrzymałość na ściskanie jest większa niż próbek referencyjnych, ale maleje w stosunku do próbki zawierającej 1% włókien – wytrzymałość na ściskanie próbek zawierających 2% włókien była wyższa o 13,6%, przy 3% włókien – o 1,4% w odniesieniu do próbek referencyjnych. Dalsze zwiększenie udziału włókien szklanych w masie próbek przyczyniło się do zmniejszenia wytrzymałości na ściskanie w porównaniu z próbkami referencyjnymi. Udział włókien w ilości 4% spowodował zmniejszenie wytrzymałości na ściskanie o ok. 30% w stosunku do próbki referencyjnej (14,46 MPa). Przy 5-proc. udziale włókien szklanych próbki modyfikowane uzyskują średnią wytrzymałość na ściskanie 9,03 MPa, co stanowi 43,8% wartości tego parametru w stosunku do próbek referencyjnych.

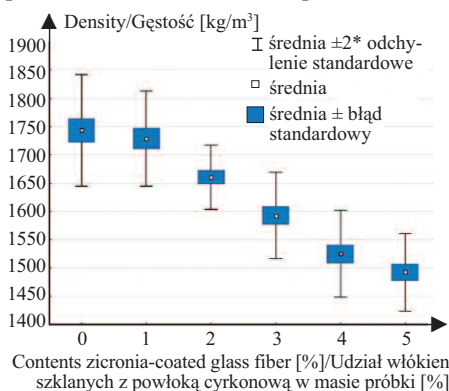


Fig. 2. The effect of zirconia-coated glass fiber content on the density of lime-sand samples

Rys. 2. Wpływ zawartości włókien szklanych z powłoką cyrkonową na gęstość próbek wapienno-piaskowych

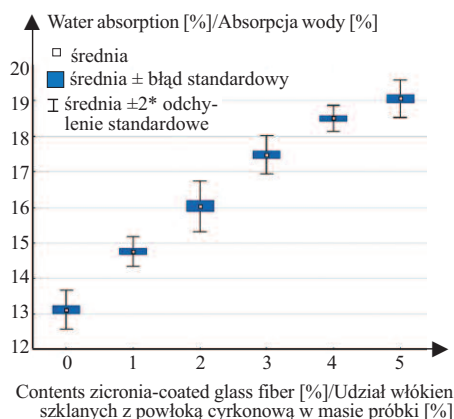


Fig. 3. The effect of zirconia-coated glass fiber content on the water absorption of lime-sand samples

Rys. 3. Wpływ zawartości włókien szklanych z powłoką cyrkonową na absorpcję wody próbek wapienno-piaskowych

The glass fibers (present in bundles) contained in the modified samples are covered with a thick layer of hydration products across their entire surface. The thickness of the compacted layer, composed of poorly developed C-S-H phase (Photo 1), reaches up to 50 μm in some areas. Large tobermorite structures, appearing in the form of thin plates, are formed on the surface of this layer. This structure is also present on the surface of sand grains and is more developed than the microstructure observed in the reference samples (Photo 2).

Based on the conducted research, it was concluded that the addition of 1% glass fibers by mass to sand-lime samples increases their compressive strength while simultaneously reducing their bulk density compared to the reference samples. The average compressive strength value remains higher than that of the reference samples up to 3% fiber content in the sample. However, further increases in fiber content result in a deterioration of the mechanical properties. A negative effect of the modification is the increased water absorption as the fiber content rises.

The zirconia-coated glass fibers used in the study are characterized by high density, but the density of the modified samples decreases as the fiber content increases. This may be due to the fibrous form of the glass, which, when combined with the spherical fraction of the sand, changes the packing of the mixture during sample formation, likely leading to the creation of pore spaces [15]. The observed increase in compressive strength may be attributed to the well-formed phase structure of the samples and the shape and size of the crystals [16] compared to the reference samples. However, this needs to be confirmed through detailed

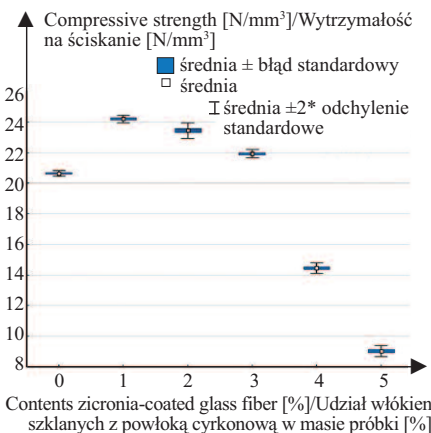


Fig. 4. The effect of zirconia glass fiber content on the compressive strength of lime-sand samples

Rys. 4. Wpływ zawartości włókien szklanych z powłoką cyrkonową na wytrzymałość na ściskanie próbek wapienno-piaskowych

noczesnym zmniejszeniu gęstości objętościowej w porównaniu z próbkami referencyjnymi. Średnia wartość wytrzymałości na ściskanie jest większa od wartości w przypadku próbek referencyjnych do 3% włókien w próbce. Dalszy wzrost ilości włókien w masie próbek powoduje pogorszenie ich właściwości mechanicznych. Negatywnym skutkiem zastosowanej modyfikacji jest też zwiększająca się absorpcja wody wraz z rosnącym udziałem zastosowanych włókien.

Zastosowane włókna szklane z powłoką cyrkonową charakteryzują się dużą gęstością, ale gęstość modyfikowanych próbek maleje wraz ze zwiększającą się ich ilością.

Może to być skutkiem włóknistej formy szkła, która w połączeniu z frakcją kulistą piasku powoduje zmianę upakowania mieszanki podczas formowania próbek, co prawdopodobnie prowadzi do powstawania przestrzeni porowych [15]. Zwiększenie wytrzymałości na ściskanie może wynikać z dobrze wykształconej budowy fazowej próbek oraz pokroju i wielkości kryształów [16] w stosunku do próbek referencyj-

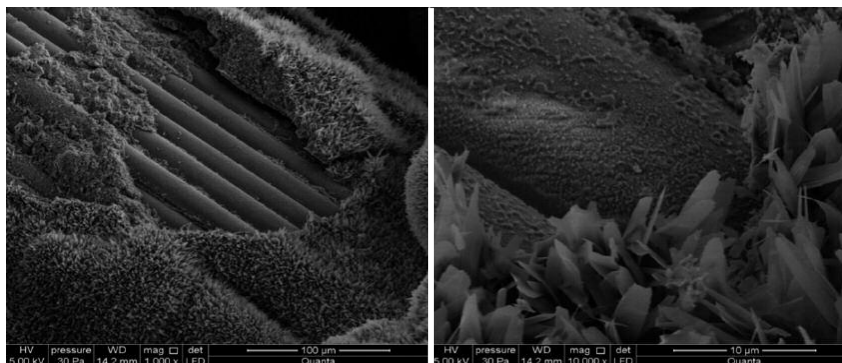


Photo 1. Microstructure formed on the surface of glass fibers
Fot. 1. Mikrostruktura wykształcona na powierzchni włókien szklanych

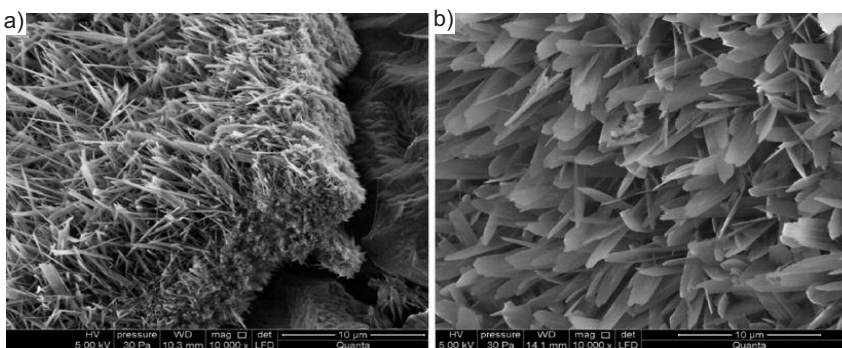


Photo 2. Microstructure formed on the sand grains in: a) reference samples; b) samples containing 1% zirconia-coated glass fibers
Fot. 2. Mikrostruktura wykształcona na ziarnach piasku w próbkach: a) referencyjnych; b) zawierających 1% włókien szklanych z powłoką cyrkonową

qualitative and quantitative studies of the microstructure and porosity of the obtained samples, which will be the subject of continued research.

Conclusions

1. As the content of zirconia-coated glass fibers increases in the mass of sand-lime samples, the density of the samples decreases, while water absorption increases.

2. The addition of zirconia-coated glass fibers up to 3% of the total sample mass improves the compressive strength of autoclaved sand-lime samples while simultaneously reducing their density.

3. The inclusion of zirconia-coated glass fibers resulted in a beneficial change in the microstructure of the samples. The zirconium oxide on the surface of the glass fibers accelerates the transformation of the semi-crystalline C-S-H phase into crystalline tobermorite, leading to a higher degree of crystallization of hydration products.

4. In samples containing 1% fibers, the tobermorite phase is better developed, characterized by large, isometric crystals. The increase in compressive strength may be related to the well-formed crystalline phases from the C-S-H group.

5. The conducted research provides a basis for further studies on determining the flexural strength of samples containing no more than 3% zirconia-coated glass fibers, as well as their thermal conductivity, related porosity, and changes in microstructure and phases formed during the autoclaving process.

Received: 24.06.2024
Revised: 31.07.2024
Published: 23.09.2024

nych. Należy jednak potwierdzić to szczegółowymi badaniami jakościowymi i ilościowymi mikrostruktury otrzymanych próbek oraz ich porowatości, co będzie przedmiotem kontynuacji badań.

Wnioski

1. Wraz ze wzrostem zawartości włókien szklanych z powłoką cyrkonową w masie próbek wapienno-piaskowych, gęstość próbek maleje, a absorpcja wody rośnie.

2. Dodatek włókien szklanych z powłoką cyrkonową w ilości do 3% w stosunku do całkowitej masy próbki wpływa na poprawę wytrzymałości na ściskanie autoklawizowanych próbek wapienno-piaskowych przy jednoczesnym zmniejszeniu ich gęstości.

3. Udział włókien szklanych z powłoką cyrkonową spowodował korzystną zmianę mikrostruktury próbek. Zawarty na powierzchni włókien szklanych tlenek cyrkonu wpływa na szybsze przekształcenie się semikrystalicznej fazy C-S-H w postać krystalicznego tobermorytu, co wpływa na wyższy stopień wykrystalizowania produktów hydratacji.

4. W próbkach zawierających 1% włókien faza tobermorytowa jest dobrze wykształcona i cechuje ją izometryczny pokrój dużych kryształów. Przyrost wytrzymałości na ściskanie może być związany z dobrym wykształceniem faz krystalicznych z grupy C-S-H.

5. Przeprowadzone badania są podstawą do dalszych badań w celu określenia wytrzymałości na zginanie próbek zawierających nie więcej niż 3% włókien szklanych z powłoką cyrkonową, przewodności cieplnej, związanej z nią porowatości próbek oraz zmian mikrostruktury i faz tworzących się w wyniku procesu autoklawizacji.

Wpłynął do redakcji: 24.06.2024 r.
Otrzymano poprawiony po recenzjach: 31.07.2024 r.
Opublikowano: 23.09.2024 r.

Literatura

[1] Dachowski R, Nowek M. Chitozan i hydroxyapatyt jako dodatki modyfikujące właściwości wyrobów silikatowych. *Materiały Budowlane*. 2015; <https://doi.org/10.15199/33.2015.12.09>.

[2] Jasińska I, Dachowski R, Jaworska-Wędrzińska M. Thermal Conductivity of Sand-Lime Products Modified with Foam Glass Granulate, *Materials*. 2021; <https://doi.org/10.3390/ma14195678>.

[3] Pytel Z. Effect of waste limestone powder on properties and sulphate-carbonate corrosion of autoclaved silicate materials, *Epitoanyag – J. Silicate Based Composite Mater*. 2022; <https://doi.org/10.14382/epitoanyag-jbcm.2022.26>.

[4] Stepień A. Recykling w materiałach budowlanych: analiza możliwości i wyników wykorzystania piasku szklanego pochodzącego z recyklingu w materiałach autoklawizowanych. *Energies*. 2023; <https://doi.org/10.3390/en16083529>.

[5] Laukaitis A, Kerienė J, Mikulskis D, Sinica M, Sezemanas G. Influence of fibrous additives on properties of aerated autoclaved concrete forming mixtures and strength characteristics of products, *Constr. and Build. Mat*. 2009; <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.04.007>.

[6] Pehlivanl ZO, Uzun I, Demir I. Mechanical and microstructural features of autoclaved aerated concrete reinforced with autoclaved polypropylene, carbon, basalt and glass fiber, *Constr. and Build. Mat*. 2015; <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.08.104>.

[7] Boukni B. Effect of glass fibers on performance of mortar and concrete, *Studies in Eng. and Exact Scien*. 2024; <https://doi.org/10.54021/seesv5n1-124>.

[8] Petri M, Spiesz P. Zaprawy cementowe zbrojone mieszanymi włóknami szklanymi, właściwości i przykłady stosowani, W: (red.) Kijowski P, Deja J. *Dni Betonu: tradycja i nowoczesność: konferencja: Wisła, 2008*.

[9] Abdullah MM, Jallo EK. Mechanical Properties of Glass Fiber Reinforced Concrete, *Al-Rafidain Engineering*. 2012; 20, 5: 128 – 135.

[10] Sahu H, Naik B. An Experimental Analysis For Utilization Of Waste Glass Fiber As An Additive In Concrete For Eco-Friendly Construction, *kuey*, 2024; <https://doi.org/10.53555/kuey.v30i5.6120>.

[11] Fang Y, Chen B, Oderji SY. Experimental research on magnesium phosphate cement mortar reinforced by glass fiber. *Constr. and Build. Mat*. 2018; <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.08.153>.

[12] Kumar D, Rex LK, Sethuraman VS, Gokulnath V, Saravanan B. High performance glass fiber reinforced concrete. *Mater. Today: Proceedings*. 2020; <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.06.174>.

[13] Dachowski R, Stepień A.: The impact of various additives on the microstructure of silicate products, *Procedia Engineering*. 2011, <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2011.11.2127>.

[14] Kičaitė A, Moceikis R. The degradation of glass fiber reinforced concrete and the potential for its improvement: A review, *The Internat. Jou. of Engineer. and Scie*. 2024; <https://doi.org/10.9790/1813-1306118126>.

[15] Namsone E, Šahmenko G, Korjakins A. Durability Properties of High Performance Foamed Concrete, *Procedia Eng*. 2017; <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.02.120>

[16] Kurdowski W. *Chemia cementu i betonu*, Wyd. Naukowe PWN, Warszawa 2010.