

Polimerobeton zbrojony krótkimi włóknami szklanymi, z dodatkiem odpadowego szkła kineskopowego

Short glass fiber reinforced polymer concrete with addition of waste cathode-ray tube (CRT) glass

Jakub Smoleń*, Klaudia Tomaszewska, Grzegorz Junak, Mateusz Kozioł

Silesian University of Technology, Faculty of Materials Engineering, Krasińskiego 8, 40-019 Katowice, Poland

*Corresponding author: J. Smoleń, e-mail: jakub.smolen@polsl.pl

Streszczenie

W pracy omówiono wykorzystanie odpadowego szkła kineskopowego, do wytwarzania polimerobetonów. Szkło kineskopowe poddano kilkakrotnemu rozdrabnianiu, w celu otrzymania ziaren mniejszych od 2 mm. Utworzono szereg polimerobetonów wzmocnionych hybrydowo: zmielonym szkłem kineskopowym, piaskiem oraz pociętym włóknem szklanym, o długości 4,5 mm i 12 mm. Zbadano wpływ dodatku włókien szklanych i ich długości na właściwości polimerobetonów, z 30% dodatkiem objętościowym żywicy epoksydowej, pełniącej rolę lepiszcza. Przeprowadzono badania szkła kineskopowego, oznaczając jego skład chemiczny, rozkład wielkości cząstek i budowę ziaren. Oznaczono wytrzymałość na zginanie i na ściskanie oraz porowatość otwartą, gęstość pozorną i nasiąkliwość wodą. Wyniki badań wykazały, że polimerobeton z dodatkiem zmielonego szkła kineskopowego, są dobrą metodą na zagospodarowanie, tego nietypowego odpadu. Uzyskane polimerobeton mają kilkakrotnie lepsze właściwości mechaniczne niż tradycyjne betony oraz znacznie mniejszą porowatość i nasiąkliwość wodą, co czyni ten materiał korzystny do produkcji wyrobów cienkościennych oraz narażonych na działanie wody i odczynników chemicznych. Dodatek ciętych włókien szklanych powoduje poprawę właściwości mechanicznych polimerobetonów, a także chroni ten materiał, przed gwałtowną dezintegracją, po przekroczeniu maksymalnych naprężeń. Jest to niezwykle ważne dla bezpieczeństwa użytkowania konstrukcji, w przypadku awarii.

Słowa kluczowe: betony polimerowe, włókna szklane, wykorzystanie odpadów, odpadowe szkło kineskopowe

Summary

This paper describes the use of CRT glass waste for the production of polymer concrete. The CRT glass was subjected to a multistage mechanical disintegration process, in a way that allowed obtaining grains smaller than 2 mm. A set of hybrid reinforced polymer concrete was produced by using: ground CRT glass, sand and cut glass fibers 4.5 mm and 12 mm long. The influence of the volume of fibers and the length of glass fibers on the properties of polymer concrete with 30% by volume of epoxy resin, acting as a binder was described. Tests of CRT glass were carried out, among others study of chemical composition, particle size distribution and analysis of grain morphology. For polymer concrete, the flexural strength and compressive strength were determined, and the open porosity, apparent density, and water absorption were examined. The test results showed that polymer concrete with the use of milled CRT glass is a good way to manage this problematic waste. The polymer concrete has several times better than traditional concretes and significantly lower porosity and water absorption, which makes this material advantageous in applications such as the production of thin-walled products and products exposed to water and chemical attack. The addition of chopped glass fibers leads to an increase in mechanical properties and also protects the material against rapid disintegration after exceeding the maximum stresses, which is extremely important for the safety of use of the structure in the event of a failure.

Keywords: polymer concrete, glass fibres, mechanical recycling, CRT wastes

1. Wprowadzenie

Beton, można najogólniej określić jako materiał budowlany, który powstaje w wyniku połączenia ziarnistego wypełniacza, spoiwem.

1. Introduction

In the most general terms, concrete can be defined as a building material that results from the joining of fine-grained filler with a

Stosując różny rodzaj i ilość kruszywa, spoiwa oraz innych dodatków, można uzyskiwać materiał o zróżnicowanych właściwościach, dostosowanych do konkretnego zastosowania.

Największe zastosowanie znajduje obecnie „zwykły” beton cementowy. Stosuje się go do budowy obiektów inżynierskich, eksploatowanych w różnych warunkach klimatycznych. Jest to materiał wykonany z mineralnego kruszywa skalnego, o wielkości ziaren nie przekraczających przeważnie 8 mm oraz spoiwa, którym jest cement. Dodatkową właściwością betonu zwykłego jest gęstość, wynosząca około 2000 kg/m³ (1). Oprócz betonów zwykłych wyróżnić można betony lekkie, o gęstości od 800 do 2000 kg/m³. Są one stosowane jako materiały w warstwach podkładowych i wyrównawczych. Natomiast betony ciężkie, o gęstości przekraczającej 2600 kg/m³, znajdują specjalne zastosowania, np. do osłabiania promieniowania jonizującego.

Chociaż beton oparty na cemencie, jest jednym z podstawowych materiałów inżynierskich, dla którego trudno znaleźć ekonomicznej alternatywy, to nie sposób pominąć jego wad. Należą do nich stosunkowo duża przepuszczalność wody, mała udarność, niewystarczająca odporność na zginanie, niewystarczająca izolacja termiczna i niezbyt duża odporność na korozję chemiczną oraz trudność w formowaniu skomplikowanych kształtów (2). Z tego powodu, poszukiwanie alternatywnych rodzajów betonu, o lepszych właściwościach, jest uzasadnione (3).

Polimerobeton, zwany zamiennie betonem syntetycznym lub betonem żywicznym, jest rodzajem betonu, w którym stosuje się spoiwo polimerowe, zamiast cementu (4). Jako spoiwo można stosować dowolne tworzywo sztuczne, jednak ze względu na właściwości, których oczekuje się od polimerobetonów, najczęściej stosuje się polimery termoutwardzalne, na przykład żywicę epoksydową lub poliestrową (5). Właściwości polimerobetonu zależą od zawartości spoiwa, uziarnienia oraz wielkości kruszywa, warunków twardnienia i zawartości, a także rodzaju drobnoziarnistego wypełniacza (6). Do zalet polimerobetonów można zaliczyć dużą trwałość, odporność na agresywne środowisko chemiczne, małą nasiąkliwość wodą, dużą mrozoodporność oraz łatwe i szybkie twardnienie. Jako wadę uznaje się występowanie uszkodzeń, spowodowanych podatnością na kruche pękanie (7).

Dodanie do betonu wzmacniających włókien, zmniejsza kruchość materiału i sprawia, że jest on w stanie przenosić obciążenia, nawet po powstaniu pęknięcia. Tłumaczy się to zwiększeniem energii pęknięcia materiału (8). Betony, do których dodaje się zbrojenie w postaci włókien, noszą różne nazwy, jednak najczęściej są nazwane fibrobetonem (9). Oprócz lepszych właściwości, związanych z kruchym pękaniem, fibrobetony mają zwiększoną odporność zmęczeniową i udarność, a często także wytrzymałość na rozciąganie i na ścinanie (10). Natomiast ich wadą jest gorsza urabialność, wynikająca z pogorszenia właściwości reologicznych, spowodowana większą zawartością włókien (11). Do betonu GRC [z ang. Glass Reinforced Concrete – beton zbrojony włóknem szklanym] z reguły dodaje się włókna o długości 6 i 12 mm, przy czym ich zawartość wynosi 5% całkowitej masy cementu (12).

binder. By manipulating the type and amount of aggregate, binder and other additives, it is possible to obtain a material with various properties tailored to a specific application.

Cement concrete is currently the most widely used. It is used in the construction of engineering structures operated under weather conditions. It is a material made of mineral rock aggregate with a grain size not exceeding 8 mm and a binder in the form of cement. An additional requirement for ordinary concrete is a density of approximately 2000 kg/m³ (1). In addition to ordinary concretes, there are light-weight concretes, with a density of 800 - 2000 kg/m³, used as materials in base and leveling layers, and heavy concretes, with a density above 2600 kg/m³ with special applications, e.g. to suppress ionizing radiation.

Although cement-based concrete is one of the basic engineering materials for which it is difficult to find an economical alternative, its drawbacks are not to be overlooked: relatively high water permeability, low impact strength, insufficient flexural strength, low modulus of elasticity, insufficient thermal insulation and low thermal resistance. chemical corrosion and difficulty in forming complex shapes (2). For this reason, the need to look for alternative types of concrete with better properties is justified (3).

Polymer concrete, also called synthetic concrete or resin concrete, is a type of concrete that uses a polymer binder instead of cement. (4) Any plastic can be used as binders, but due to the properties expected from polymer concrete, thermosetting polymers such as epoxy resin and polyester resin are used most often (5). The properties of polymer concrete depend on the content of the binder, the distribution and size of the aggregates, the curing conditions, and the content and type of fine-grained filler (6). The advantages of polymer concrete include high durability, resistance to aggressive chemical environment, low water absorption, high frost resistance and easy and quick hardening. The defect is the susceptibility to defects, manifested by the susceptibility to brittle cracking (7).

The addition of dispersed fiber reinforcement in the concrete reduces the brittle nature of the material and makes it able to bear loads even after a crack has formed. This is explained by an increase in the fracture energy of the material (8). Concrete to which reinforcement in the form of fibers is added has different names, but the most common term is fiber-reinforced concrete (FRC) (9). In addition to the better characteristics related to brittle fractures, fiber-reinforced concrete is characterized by increased fatigue resistance and impact toughness, and often also increased tensile and shear strength (10). Their disadvantage is the deteriorated workability resulting from the deterioration of rheological properties along with a higher fiber content (11). As a rule, fibers 6 mm and 12 mm long are added into GRC concrete in the content of 5% of the total weight of the cement-based material (12).

In the case of polymer concrete, natural and synthetic fibers (such as carbon fibers and glass fibers) increase the mechanical properties particularly well (13). The issue of reinforcing polymer concrete with fibers is a relatively new and rare topic discussed in the literature (14). Polymer concrete is most often reinforced with

W przypadku betonów polimerowych włókna naturalne i syntetyczne, do których zaliczamy włókna węglowe oraz szklane, szczególnie dobrze poprawiają właściwości mechaniczne (13). Zagadnienie wzmocnienia polimerobetonów włóknami, jest stosunkowo nową metodą, rzadko omawianą w literaturze (14). Polimerobeton są najczęściej zbrojone włóknami naturalnymi (15-17), syntetycznymi włóknami polimerowymi (18-20), ze szkła (21-23) oraz węglowymi (24-25).

Czasem dodaje się do betonów kruszywo, uzyskane z materiałów odpadowych. Jest to dobra alternatywa, zamiast składowania odpadów, co przyczynia się do zmniejszenia obciążenia środowiska (26). Odpadem, który można dodawać do betonu jest stłuczka szklana, ze szkła kineskopowego (27-30).

Aczkolwiek, wraz z rozwojem technologii i wprowadzeniem ekranów plazmowych, ciekłokrystalicznych oraz lamp ledowych, zmniejszył się rynek zbytu szkła kineskopowego. Jednak, ciągle pozostał problem zagospodarowania tych odpadów w zakresie, który jest już stosowany (31). Odpady szkła kineskopowego były dotychczas wykorzystywane do ponownego wytwarzania kineskopów, w zamkniętym recyklingu (32). Zagospodarowanie tego odpadu do wytwarzania innego produktu, np. opakowań dla wyrobów spożywczych, jest niemożliwe, ze względu na zagrożenie jakie stwarza zawarty w szkłe kineskopowym ołów (33). W przypadku braku możliwości recyklingu odpadów, dochodzi do ich składowania. Jest to jednak szkodliwe dla środowiska gromadzenie szkła kineskopowego, bowiem przyczynia się do zanieczyszczenia ołowiem zarówno gleby jak i wód gruntowych, bowiem może występować wypłukiwanie tego metalu przez kwaśne deszcze, z pokruszonych kawałków szkła (34).

Ze względu na skalę problemu zaczęto poszukiwać innych metod zagospodarowania odpadów ze szkła kineskopowego. Wielu naukowców pracowało nad wykorzystaniem tych odpadów w formie dodatku do cegieł, płytek ceramicznych i kamionki wypalanej, w celu polepszenia ich właściwości (37,38). Kolejną, już wcześniej wspomnianą metodą jest dodawanie tego szkła do betonu, jako składnika zastępującego częściowo cement (28, 39), lub pełniącego rolę kruszywa (40,41). Zwiększeniem zakresu materiałów konstrukcyjnych, zawierających te odpady ze stłuczki szklanej, może być także ich dodatek do polimerobetonów (42, 43).

W pracy przedstawiono wytwarzanie polimerobetonu, wzmocnionego włóknami szklanymi i zawierającego odpad, w postaci szkła kineskopowego. Szkło kineskopowe jest odpadem trudnym do przetworzenia i niebezpiecznym w składowaniu, dlatego istnieje potrzeba opracowania dobrych metod jego recyklingu. Rozwiązaniem problemu może być stosowanie tego odpadowego szkła, jako dodatku do polimerobetonu. Dodatek stłuczki kineskopowej nie rozwiązuje jednak jednej z głównych wad betonu – podatności na kruche pękanie, czemu można zapobiegać przez zbrojenie włóknami.

W artykule połączono dwa zagadnienia – stosowanie odpadowego szkła kineskopowego i wzmocnianie betonu włóknami. Przedstawiono technologię wytwarzania włókien z odpadowej stłuczki szkla-

natural fibers (15-17), synthetic polymer fibers (18-20), glass fibers (21-23) and carbon fibers (24-25).

It is possible to add aggregate made of waste materials to concrete. It is a good alternative to landfilling and helps to relieve the environment (26). The waste that can be treated this way is CRT glass cullet (27-30).

However, with the advancement of technology and the introduction of plasma, liquid crystal and LED screens, the market for CRT glass has decreased. However, there was still a problem with volume management, which has already entered circulation (31). Until now, CRT glass recycling has been carried out in a closed loop and the waste was used to remanufacture CRTs [mechanical recycling] (32). Management of this waste in open loops, i.e. by producing another object, e.g. food packaging, is impossible due to the risk posed by lead contained in CRT glass (33). If recycling of waste is not possible, it is deposited. However, it is an environmentally harmful method of managing CRT glass. It contributes to lead contamination in both soil and groundwater through leaching this metal by acid rain from broken glass pieces (34).

Due to the large scale of the problem, alternative ways of managing CRT glass waste were searched. Many researchers have worked on using it as an additive to bricks, ceramic tiles and fired stoneware in order to improve their properties (37, 38). Another, already mentioned method, is the use of the described waste in concrete as a component that partially replaces cement (28, 39) or as a filler that acts as aggregate (40, 41). An extension of the creation of construction materials containing cullet waste may also be the manufacturing of polymer concrete based on them (42, 43).

This article describes the production of glass fiber reinforced polymer concrete containing CRT glass waste. CRT glass is a waste that is difficult to process and dangerous to landfill, hence there is a need to develop effective methods of its recycling. The problem may be solved by creating a polymer concrete filler on its basis. The addition of CRT cullet does not, however, solve one of the main drawbacks of concretes - their susceptibility to brittle cracking. This is done by fiber reinforcement. The article combines two aspects - CRT glass recycling and fiber reinforcement of concrete. The paper presents the technology of obtaining a filler in the form of glass cullet from waste, and describes the method of producing polymer concrete based on glass cullet using an epoxy resin binder and glass fiber reinforcement. Five series of samples with different content and the length of the fibers were produced. The mechanical properties of the obtained materials, such as compressive strength and flexural strength, were tested. An Archimedes' test was also carried out to determine the apparent density, open porosity and water absorption of the material. The microstructure of CRT glass was observed using an electron scanning microscope and its chemical composition was determined using EDS. The results of the measurements allowed to draw conclusions as to the applicability of the obtained materials.

nej oraz opisano metodę otrzymywania polimerobetonu, ze stłuczki kineskopowej. W tej metodzie stosowano żywicę epoksydową, jako spoiwo oraz do wzmacniania tego polimeru, włóknami szklanymi.

Przygotowano pięć serii próbek z różną zawartością włókien, o różnej długości. Badano właściwości mechaniczne otrzymanych materiałów, a mianowicie wytrzymałość na ściskanie i na zginanie. Przeprowadzono również próbę Archimedesesa, w celu określenia gęstości pozornej, porowatości otwartej oraz nasiąkliwości materiału. Przeprowadzono obserwację mikrostruktury szkła kineskopowego pod mikroskopem skaningowym oraz określono jego skład chemiczny, za pomocą EDS. Wyniki pomiarów pozwoliły na wyciągnięcie wniosków, dotyczących zakresu stosowania uzyskanych materiałów.

2. Przeprowadzone doświadczenia

2.1. Materiały

Przygotowano pięć próbek polimerobetonów o różnym składzie, zbrojonych ciętymi włóknami szklanymi, zgodnie z tablicą 1.

Odpady ze szkła kineskopowego otrzymano od firmy zajmującej się składowaniem niebezpiecznych odpadów, w południowej Polsce. Bez dodatkowego oczyszczania, odpad poddano mechanicznemu kruszeniu tak, aby maksymalny wymiar stłuczki nie przekraczał 30 mm. Następnie, rozdrobniony odpad mielono w młynie krzyżakowo-bijakowym Retsch SK300, na sitach trapezowych o wielkości oczek 2 mm. Budowlany piasek kwarcowy KREISEL – Polska oraz zmielony odpad szkła kineskopowego, suszono w suszarce laboratoryjnej, w temperaturze około 80°C, przez 24h. Włókno szklane cięte – Krosglass, Krosno, Polska, ze szkła boro-glino-krzemianowego, pokrytego preparatem złożonym z silanów, dodawano w ilości 1% i 3% objętościowych, do polimerobetonu. Zastosowano dwie długości włókien szklanych: 4,5 mm – ER-5001/4,5mm/15 oraz 12 mm –ER-2011/12mm/15.

Do badań, jako materiał lepiszcza, wykorzystano żywicę epoksydową LH289 i utwardzacz H135, ich stosunek masowy wynosił 100:35 – Havel Composites, Republika Czeska. Masy mieszano mieszadłem ręcznym. Pozwoliło to oszacować ich urabialność, któ-

Tablica 1 / Table 1

SKŁADY PRÓBEK POLIMEROBETONÓW

COMPOSITION OF POLYMER CONCRETE SAMPLES

Sample / Próbka	CRT glass waste, vol % Odpad szkła kineskopowego, % obj	Sand, vol% Piasek, % obj.	Chopped glass fibres, vol % Włókno szklane cięte, % obj	Epoxy resin, vol % Żywica epoksydowa, % obj
PC	35.0%	35.0%	0	30%
PC_4.5_1 ¹	34.5%	34.5%	1%	
PC_4.5_3 ¹	33.5%	33.5%	3%	
PC_12_1 ²	34.5%	34.5%	1%	
PC_12_3 ²	33.5%	33.5%	3%	

¹ włókno szklane o długości 4,5 mm / glass fiber, 4.5 mm long

² włókno szklane o długości 12 mm / glass fiber, 12 mm long

2. Experimental

2.1. Materials

Five compositions of polymer concrete samples reinforced with chopped glass fibers were prepared in accordance with Table 1.

The CRT glass waste was obtained from a hazardous waste storage company in southern Poland. Without additional treatment, the waste was mechanically crushed so that the maximum cullet size did not exceed 30 mm. Subsequently, the shredded glass waste was ground in a Retsch SK300 cross-beater mill on 2 mm trapezoidal screens. KREISEL construction quartz sand [Poland] and milled CRT glass waste were dried in a laboratory dryer at a temperature of about 80°C for 24 hours in order to get rid of the moisture. Chopped glass fibers [Krosglass, Krosno, Poland] made of borosilicate glass coated with a silane-based preparation was added to the polymer concrete in an amount of 1% and 3% by volume. Two lengths of glass fibers were used: 4.5 mm [ER-5001/4.5mm/15] and 12 mm [ER-2011/12mm/15]. Epoxy resin LH289 and hardener H135 [mass ratio 100: 35, Havel Composites, Czech Republic] were used as the binder material for the tests. The masses were mixed using a handheld mixer. This allowed to evaluate their workability. The workability of the sand was assessed visually. It has been found that the masses containing shorter glass fibers do well with no appreciable difference from the mass without the fibers. In the case of the sand containing longer fibers [12 mm], there was an evident deterioration of the workability compared to the sand containing shorter fibers or no fibers. Still, the workability was fairly good.

2.2. Methods

A particle size distribution (PSD) study was performed on milled CRT glass using a Malvern Mastersizer 3000 particle size analyzer (Malvern Panalytical, UK), refractive index $n = 1.522$, with a semi-automatic Hydro EV attachment. The tests were carried out in two series, the first without ultrasounds and the second with the use of ultrasounds. The morphology and chemical composition of milled CRT glass grains were analyzed using the scanning electron microscopy [SEM] and energy dispersive X-ray spectroscopy [EDS] techniques. This was done using a SEM Phenom PRO X microscope [Thermo Fisher Scientific, Waltham, MA, USA] with

rażą oceniano organoleptycznie. Stwierdzono, że masy zawierające krótsze włókna szklane urabiają się dobrze, bez wyczuwalnej różnicy w porównaniu z masą niezawierającą włókien. W przypadku mas zawierających dłuższe włókna – 12 mm, stwierdzono wyraźne pogorszenie urabialności, w porównaniu z masą zawierającą krótsze włókna, lub nie zawierającą włókien. W dalszym ciągu jednak, urabialność była dosyć dobra.

2.2. Metody

Zbadano rozkład wielkości cząstek [RWC] zmielonego szkła kineskopowego za pomocą analizatora Malvern Mastersizer 3000 – Malvern Panalytical, Wielka Brytania, przy współczynniku załamania światła $n = 1.522$, z półautomatyczną przystawką Hydro EV. Badania przeprowadzono dwukrotnie, pierwsze bez użycia ultradźwięków, drugie z ich użyciem. Do badania morfologii i składu chemicznego ziaren zmielonego szkła kineskopowego zastosowano skaningową mikroskopię elektronową oraz spektroskopię rentgenowską, z dyspersją energii. Stosowano mikroskop skaningowy Phenom PRO X Thermo Fisher Scientific, Waltham, MA, USA, z detektorem EDS. Rozkład wielkości ziaren piasku określono za pomocą analizy sitowej.

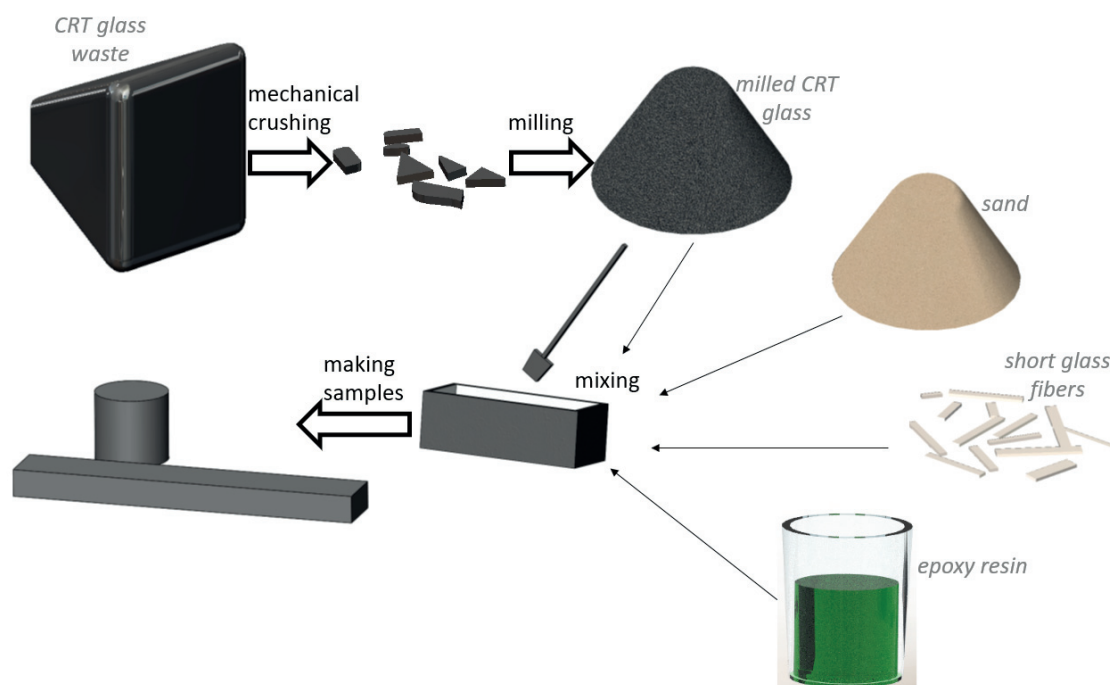
Suche wypełniacze, w odpowiednich stosunkach objętościowych, mieszano z żywicą epoksydową, aż do uzyskania mieszaniny jednorodnej, a wszystkie powierzchnie proszków i włókien zostały pokryte warstwą ciekłej żywicy. Stosunek objętościowy składników stałych do składników ciekłych był stały dla wszystkich próbek i wynosił 70:30. Składniki odlewano do form i po zmieszaniu żywicy epoksydowej z wszystkimi pozostałymi składnikami, co pokazano na rys. 1, przeprowadzono proces twardnienia, w temperaturze 60°C, przez 12 godzin. Schemat przygotowania polimerobetonów przedstawiano na rys. 1.

an EDS detector. The sand grain size distribution was determined in the sieve analysis test.

Dry fillers in appropriate volumetric ratios were mixed with epoxy resin until the mixture was homogeneous and all surfaces of the powders and fibers were covered with a layer of liquid resin. The volume ratio of solid components to liquid components was constant for all samples at 70:30. The components were poured into molds and after the resin had cross-linked, the post-curing process was carried out at a temperature of 60°C for 12 hours. The scheme of polymer concrete production is shown in Figure 1.

A three-point bending test was carried out in accordance with the recommendations of the PN-EN ISO 14125 standard on cuboidal specimens with dimensions of 200x50x25 mm, where 25 mm is the specimen height. The three-point bending test was carried out on the INSTRON 4469 testing machine with a spacing of supports 190 mm and a deformation speed of 10 mm / min. The load was applied to the upper surface of the sample. Cylindrical samples with a height and diameter of 50 mm were used to determine the compressive strength in relation to the PN-EN ISO 604: 2006 standard. The compression test was performed on the MTS-810 testing machine with a deformation rate of 10 mm / min. Both tests were carried out at room temperature. Photographs of polymer concrete samples after the bending test were taken to show the nature of the material destruction and to show the influence of glass fibers on the integrity of the structure.

The Archimedes test was performed to describe the open porosity, apparent density and water absorbability of polymer concrete. The Archimedes test was carried out on samples with dimensions of 30x20x10 mm, where 10 mm is the height of the sample.



Rys. 1. Schemat otrzymywania próbek polimerobetonów

Fig. 1. Scheme of making polymer concrete samples

Przeprowadzono próbę trójpunktowego zginania, zgodnie z zaleceniami normy PN-EN ISO 14125 na prostopadłościennych próbkach o wymiarach 200x50x25 mm, gdzie 25 mm jest wysokością próbki. Próbę trójpunktowego zginania wykonano na maszynie wytrzymałościowej INSTRON 4469, przy rozstawie podpór 190 mm i prędkości odkształcania 10 mm/min. Obciążenie przyłożono do górnej powierzchni próbki. Próbki cylindryczne, o wysokości i średnicy 50 mm, wykorzystano do określenia wytrzymałości na ściskanie, zgodnie z normą PN-EN ISO 604: 2006. Próbę ściskania wykonano na maszynie wytrzymałościowej MTS-810, z prędkością odkształcania 10 mm/min. Obie próby wykonano w temperaturze pokojowej. Fotografie próbek polimerobetonów wykonano po próbie zginania, w celu wykazania stopnia zniszczenia materiału i wpływu włókien szklanych na zachowanie mikrostruktury.

Próbę Archimedesesa wykonano w celu opisanego porowatości otwartej, gęstości pozornej oraz nasiąkania wodą, polimerobetonów. Tę próbę przeprowadzono na próbkach o wymiarach 30x20x10 mm, gdzie 10 mm jest wysokością próbki.

3. Wyniki

3.1. Ocena wypełniaczy

Rozdrabnianie szkła kineskopowego jest procesem wieloetapowym, w którym po wstępnym rozdrobieniu mechanicznym, stłuczka szklana zostaje oddzielona od innych fragmentów zniszczonego kineskopu. Pozostawienie metali, jako mieszaninę ze stłuczką szklaną, mogłoby doprowadzić do uszkodzenia młyna krzyżakowo-bijakowego, szczególnie sit separacyjnych, wewnątrz urządzenia. Zastosowanie sit separacyjnych, o wielkości otworów 2 mm, pozwala na otrzymywanie ziaren o średnich wymiarach 90 μm . Dominującą frakcją są ziarna o wielkości około 200 μm – $D_{v,90}$ oraz 70,9 μm – $D_{v,50}$, co pokazano na rys. 2. Na rysunku widoczne są dwie serie danych, jedna z nich przedstawia serię z zastosowaniem ultradźwięków, a druga, jest serią bez ultradźwięków. Zastosowanie ultradźwięków nie daje innych wyników niż wyniki serii bez ultradźwięków, co wskazuje, że ziarna zmielonego szkła nie tworzą aglomeratów.

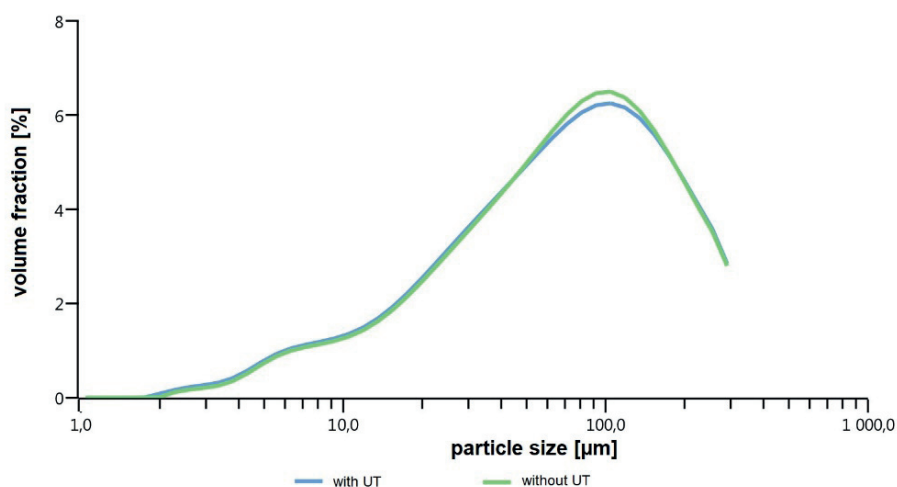
Morfologię ziaren zmielonego szkła kineskopowego pod mikroskopem skaningowym, pokazano na rys. 3, a jego skład chemiczny na rys. 4. Ziarna szkła po procesie mielenia, wykazują zróżnicowaną wielkość, co wynika z rozdrabniania kruchego materiału, w młynie krzyżakowo-bijakowym. W celu uniknięcia występowania zróżnicowanych frakcji ziarnowych w proszku, można zastosować separację sitową, co jednak powoduje dodatkowe koszty, w procesie produkcji polimerobetonów. Szkło po procesie mielenia ma zastrzone krawędzie, powstające w wyniku kruszenia materiału. Nie jest to

3. Results

3.1. Assessment of fillers

CRT glass shredding is a multistage process where, after initial mechanical fragmentation, the glass cullet has to be separated from the electronics residue. Leaving metals in the cullet volume could damage the elements of the cross-beater mill, especially the separation screens inside the device. The use of 2 mm separation sieves allows to obtain grains with an average size of 90.9 μm . The dominant fraction is the fraction with the grain size of about 204 μm - $D_{v,90}$ and 70.9 μm $D_{v,50}$, as shown in Fig. 2. The graph shows two data series, one of them shows a series using ultrasound, and the other is series without ultrasound. The use of ultrasound does not give different results than the results of the series without ultrasound, which indicates that the ground glass grains do not form agglomerates.

The morphology of the milled CRT glass grains is presented in Figure 3, and the chemical composition of the glass in Fig. 4. Glass grains after the grinding process have a different size, which is due to the nature of the grinding of brittle materials in the cross-beater mill. In order to avoid the occurrence of diversified grain fractions in the powder, an optional sieve separation process can be used, which, however, will generate additional costs in the polymer concrete production process. Glass grains after the grinding process have sharp edges resulting from the crushing of the material. This is not favorable from the point of view of the fracture mechanics of the materials. However, in the case of a relatively plastic matrix, such as a polymer resin, in the case of polymer concrete, the adverse effect of sharp edges will undoubtedly be less than in the case of cement-based concretes. The analysis of the chemical composition of CRT glass showed differences in the content of some elements. The presence of oxygen, silicon, sodium, potassium and aluminum results from the use of oxides for the production of glass in the shield part. The recorded peaks of lead, strontium and barium atoms come from the rear of the picture tube, where the electron



Rys. 2. Rozkład wielkości cząstek – RWC, zmielonego szkła kineskopowego, analizator Malvern Mastersizer 3000

Fig. 2. Particle size distribution [PSD] in milled CRT glass [Malvern Mastersizer 3000 analyzer]



Rys. 3. Ziarna szkła kineskopowego, po zmieleniu pod mikroskopem, powiększenie 380x

Fig. 3. Morphology of CRT glass grains after milling (SEM image, 380x magnification)

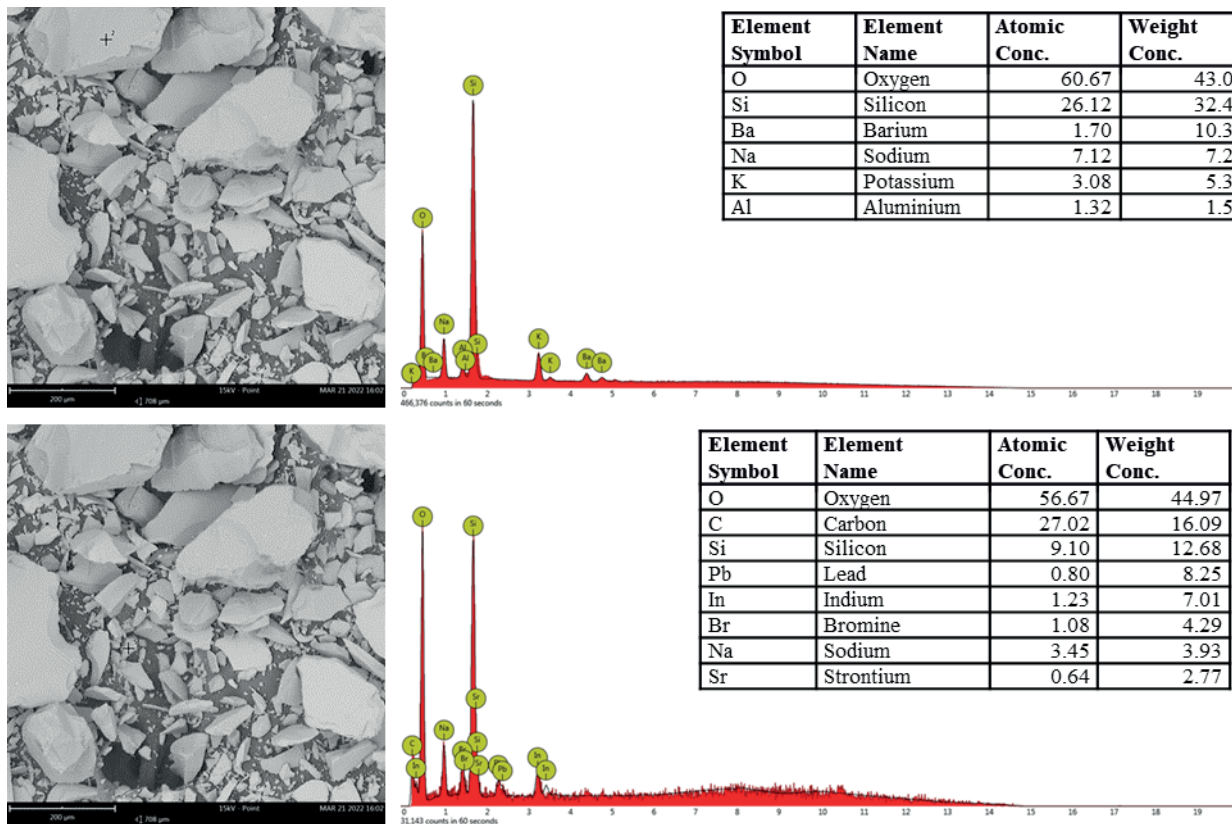
korzystne, z punktu widzenia mechaniki pękania materiałów. Jednak, w przypadku stosunkowo plastycznej osnowy, jaką jest żywica polimerowa w przypadku polimerobetonów, niekorzystny wpływ ostrych krawędzi będzie bez wątpienia mniejszy, niż w przy-

gun is located. The rear CRT glass has a characteristic blue-green color, as described in publications (44-46). The recorded carbon atoms come from the conductive tape on which the ground glass for testing was placed.

A sieve analysis of sand was performed, the results of which are presented in Fig. 5. The presented histogram shows that approximately 85% of the sand grains have a size of 0.2 to 0.8 mm. The combination of finely milled glass with several times larger grains of sand in the 1:1 ratio is advantageous from the point of view of strength properties, workability of the mass, as well as the consumption of epoxy resin acting as a binder. With a good filling of the concrete volume with finer grains, the amount of matrix necessary to fill this volume is reduced. In the industrial production of traditional concretes, coarse-grained aggregates (e.g., gravel) are also combined with fine-grained sand.

3.2. Mechanical properties tests

The compressive strength of the tested polymer concrete is shown in Fig. 6. Polymer concrete without glass fibers [PC] has an average compressive strength of 96.2 MPa. The highest compressive strength is characterized by polymer concrete with 1% by volume of 4.5 mm glass fibers. Increasing the volume of 4.5-mm-long glass fibers to 3% causes a decrease in compressive strength by more than 10 MPa. Glass fibers with a length of 12 mm lead to a decrease in compressive strength to about 80 MPa. The decrease in compressive strength in polymer concrete may be caused by the voids in the material, which are caused by the difficult workability



Rys. 4. Skład chemiczny szkła kineskopowego, po zmieleniu [analiza EDS]

Fig. 4. Analysis of the chemical composition of CRT glass after milling [EDS analysis]

padku betonów cementowych. Analiza składu chemicznego szkła kineskopowego wykazała zróżnicowanie w zawartości niektórych pierwiastków. Zawartość tlenu, krzemu, sodu, potasu i glinu, wynikają z zastosowania tlenków do produkcji szkła, a więc w części ekranowej. Zarejestrowane piki, pochodzące od ołowiu, strontu i baru, pochodzą, z tylnych części kineskopu, w którym znajduje się działo elektronowe. Szkło kineskopowe z tylnych części, ma charakterystyczne niebiesko-zielone zabarwienie, co opisano w publikacjach (44-46). Zarejestrowane atomy węgla pochodzą z taśmy przewodzącej, na której umieszczono mielone szkło do badań.

Wykonano analizę sitową piasku, której wyniki pokazano na rysunku 5. Z przedstawionego histogramu wynika, że około 85% ziaren piasku ma wielkość od 0,2 do 0,8 mm. Zestawienie drobno zmiełonego szkła z kilkakrotnie większymi ziarnami piasku w stosunku 1:1 jest korzystne z punktu widzenia właściwości: wytrzymałości, urabialności masy, a także zużycia żywicy epoksydowej, pełniącej rolę lepiszcza. Przy dobrym wypełnieniu objętości betonu drobniejszymi ziarnami, zmniejsza się zawartość osnowy, koniecznej do wypełnienia tej objętości. W przemysłowej produkcji betonów tradycyjnych, także stosuje się razem kruszywa gruboziarniste – np. żwir, z drobnoziarnistym piaskiem.

3.2. Badania właściwości mechanicznych

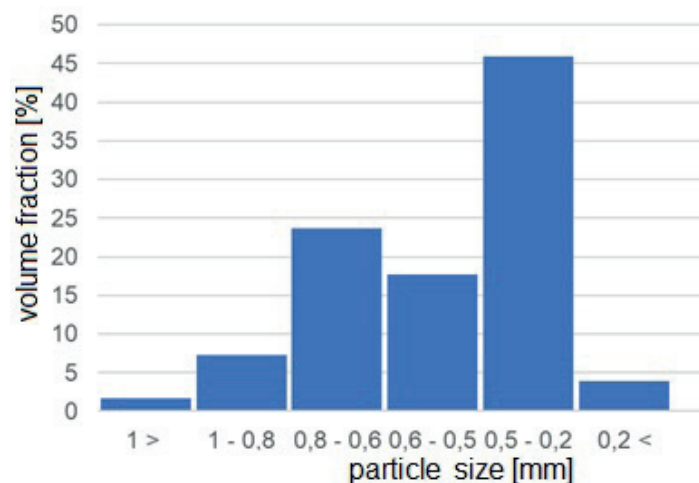
Wytrzymałość na ściskanie badanych polimerobetonów przedstawiono na rys. 6. Polimerobeton bez włókien szklanych [PB] ma średnią wytrzymałość na ściskanie 96,2 MPa. Największą wytrzymałość na ściskanie ma polimerobeton z 1% dodatkiem objętościowym włókien szklanych, o długości 4,5 mm. Zwiększenie objętości włókien szklanych – o długości 4,5 mm, do 3%, powoduje spadek wytrzymałości na ściskanie o ponad 10 MPa. Włókna szklane o długości 12 mm, powodują spadek wytrzymałości na ściskanie do około 80 MPa. Spadek wytrzymałości na ściskanie polimerobetonów może być spowodowany powstającymi porami w materiale, do czego przyczynia się utrudniona urabialność masy w próbkach PB – 4,5 oraz w próbkach z włóknem szklanym, o długości 12 mm: PB_12_1 i PB_12_3. Inną przyczyną zmniejszenia wytrzymałości na ściskanie, może być powstanie lokalnych obszarów o silnej orientacji kierunkowej wytrzymałości, czyli jej anizotropii. Może ona przyczynić się do powstawania uprzywilejowanych płaszczyzn ścinania. Jest to bardziej prawdopodobne w przypadku dłuższych włókien (47, 48). W przypadku włókien 4,5 mm dla 1% dodatku zanotowano wzrost, a dla 3% spadek wytrzymałości na ściskanie, w porównaniu z betonem bez włókien. Świadczy to o „konkurowaniu” dwóch właściwości wywołanych obecnością włókien: wzmacniającego efektu przenoszenia przez włókna obciążeń oraz osłabiającego – w przypadku ściskania, wspomnianego powyżej efektu orientacji mikrostruktury. Nietrwałość właściwości mechanicznych związanych z wytrzymałością na ściskanie, dla kompozytów zawierających pocięte włókna szklane, jest często spotykana (49, 50).

Najważniejszą zaletą wynikającą z dodawania pociętych włókien szklanych jest zwiększenie ich wytrzymałości na zginanie i rozciąg-

of the masses in samples PC_4.5_1 and samples with glass fiber with a length of 12 mm: PC_12_1 and PC_12_3. Another reason for the reduction in compressive strength may be the formation of local areas with a strong directional strength orientation [anisotropy], which in turn may contribute to the formation of privileged shear planes. This is more likely to occur with longer fibers (47,48). In the case of 4.5 mm fibers, we have an increase [for 1% of fibers] and a decrease [for 3% content] in compressive strength, compared to concrete without fibers. This proves that two effects caused by the presence of fibers are “competing”: the reinforcing effect of carrying loads through the fibers and the weakening (in the case of compression) of the above-mentioned effect of the structure orientation. Instability of the compressive mechanical properties for composites containing chopped glass fibers is common (49, 50).

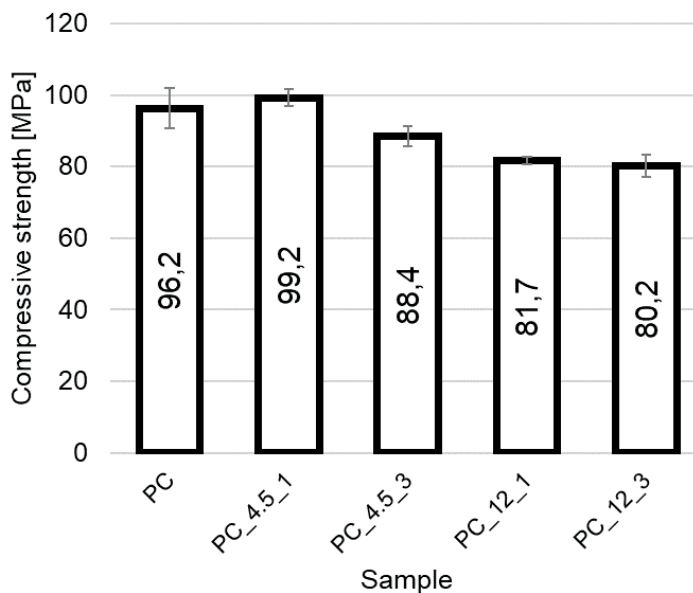
The most important advantage of adding chopped glass fibers is the increase in their bending and tensile strength. The results of the three-point bending test are shown in Figure 7, and the photographs of the samples after bending are shown in Figure 8.

The lowest flexural strength is characterized by polymer concrete without glass fibers (PC sample), where the average strength is about 35 MPa. The addition of glass fibers in volume of 1% leads to an increase in flexural strength to about 39 MPa, regardless of the length of the fibers. In polymer concrete with 3% by volume of glass fibers, an increase in flexural strength up to 44.2 MPa for 4.5-mm-long fibers [PC_4.5_3] and 41.2 MPa for 12-mm-long fibers [PC_12_3] was recorded. In the three-point bending test, only the sample without glass fiber reinforcement [PC] disintegrated at maximum force [Fig. 8a], while the samples containing glass fiber did not disintegrate [Fig. 8b]. Specimens with fiberglass have a visible scratch where the load is applied, but retain their shape and dimensions. Such behavior of polymer concrete is extremely important for the safety of use of products in the event of material destruction. The appearance of a crack disqualifies the product from further use, however, maintaining the integrity of the material allows you to avoid sudden destruction of the structure.



Rys. 5. Analiza sitowa piasku zastosowanego w badaniach

Fig. 5. Sieve analysis of the sand used in the research



Rys. 6. Wytrzymałość na ściskanie badanych polimerobetonów – oznaczenia wg tabeli 1

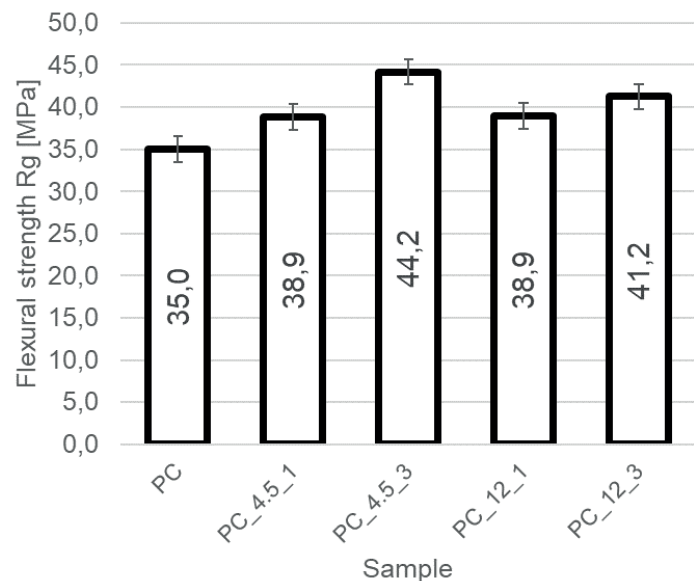
Fig. 6. Compressive strength of the tested polymer concrete - designations according to Table 1

ganie. Wyniki próby trójpunktowego zginania, pokazano na rys. 7, a fotografie próbek po zginaniu, przedstawia rys. 8.

Najmniejszą wytrzymałość na zginanie ma polimerobeton bez włókien szklanych – próbka PB, której średnia wytrzymałość wynosi około 35 MPa. Dodatek 1% objętościowego włókien szklanych, powoduje zwiększenie wytrzymałości na zginanie do około 39 MPa, niezależnie od długości włókien. W polimerobetonach, z 3% dodatkiem objętościowym włókien szklanych, stwierdzono wzrost wytrzymałości na zginanie wynoszący 44,2 MPa, dla włókien o długości 4,5 mm – PB_4.5_3 oraz 41,2 MPa dla włókien o długości 12 mm – PC_12_3. W próbie trójpunktowego zginania, jedynie próbka bez wzmocnienia włóknem szklanym – PB uległa rozpadowi, przy maksymalnej sile – rys. 8a, natomiast próbki zawierające włókno szklane nie uległy rozpadowi – rys. 8b. Próbki z włóknami szklanymi mają widoczną rysę w miejscu przyłożonego obciążenia, ale zachowują swój kształt i wymiary. Takie zachowanie polimerobetonu jest niezwykle ważne, dla bezpieczeństwa użytkowania wyrobów, w przypadku zniszczenia materiału. Pojawiająca się rysa dyskwalifikuje wyrób z dalszej eksploatacji, jednakże zachowanie integralności materiału, pozwala uniknąć gwałtownego zniszczenia konstrukcji.

3.2. Próba Archimedes

W próbie Archimedes

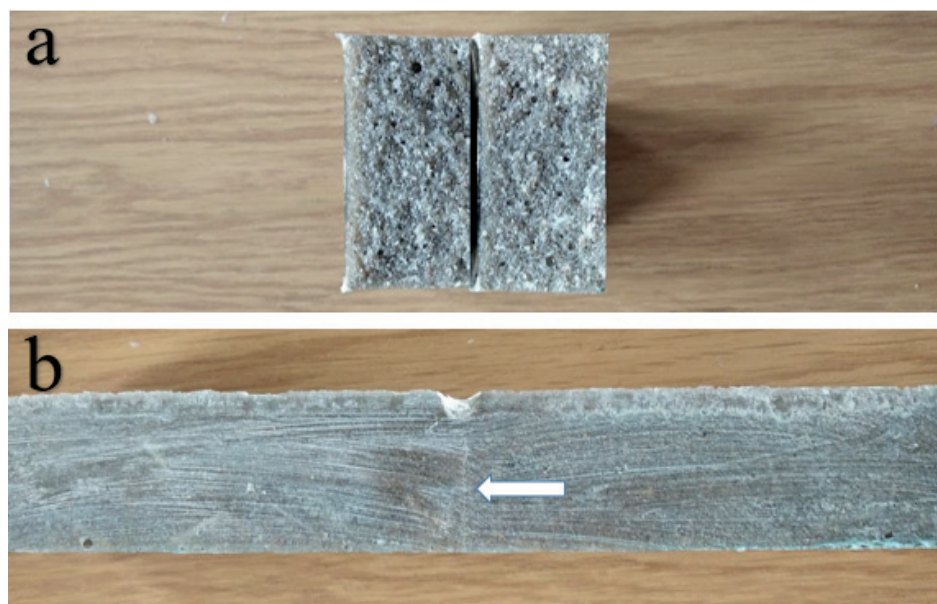


Rys. 7. Wytrzymałość na zginanie polimerobetonów – oznaczenia wg tabelicy 1

Fig. 7. Flexural strength of the tested polymer concrete - designation according to Table 1

3.2. Archimedes' test results

In the Archimedes test, the open porosity, apparent density and water absorbability of polymer concrete were determined, which is included in Table 2. The apparent density of the tested polymer concrete is about 1.9 g/cm³. The water absorption of polymer concrete without glass fibers [PC] is 0.5%. The addition of 4.5 mm long glass fibers causes a decrease in open porosity and water absorption. The water absorption of PC_4.5 samples is about 0.2%. The decrease in open porosity and water absorption probably results



Rys. 8. Rodzaj zniszczeń polimerobetonów w próbie trójpunktowego zginania: a) próbka PB – rozwarne pęknięcie, b) próbka PB_4.5_3 – tylko rysa

Fig. 8. The nature of polymer concrete damage after the three-point bending test: a) PC sample - complete decohesion, b) PC_4.5_3 sample - only a scratch

Tablica 2 / Table 2

POROWATOŚĆ OTWARTA, GĘSTOŚĆ POZORNA ORAZ NASIĄKLIWOŚĆ BADANYCH POLIMEROBETONÓW
OPEN POROSITY, APPARENT DENSITY AND WATER ABSORPTION OF THE TESTED POLYMER CONCRETE

Właściwość / Property	PB	PB_4.5_1	PB_4.5_3	PB_12_1	PB_12_3
Porowatość otwarta / Open porosity, %	0.97	0.31	0.36	1.17	1.22
Gęstość pozorna / Apparent density, g/cm ³	1.90	1.93	1.92	1.93	1.95
Nasiąkliwość / Water absorption, %	0.51	0.16	0.19	0.61	0.62

wość polimerobetonów, co zawarto w tabeli 2. Gęstość pozorna badanych polimerobetonów wynosi około 1,9 g/cm³. nasiąkliwość polimerobetonu bez włókien szklanych – PB, wynosi 0,5%. Dodatek włókien szklanych o długości 4,5 mm powoduje spadek porowatości otwartej i nasiąkania. Nasiąkliwość próbek PB_4.5 wynosi około 0,2 %. Spadek porowatości otwartej i nasiąkliwości, wynika zapewne z wypełniania porów między ziarnami piasku i mielonego szkła, przez krótkie włókna szklane. Dodatek włókien szklanych o długości 12 mm, powoduje z kolei wzrost porowatości otwartej i nasiąkliwości. Może on wynikać z pustek wewnątrz materiału, powstałych z powodu pogorszenia urabialności masy, zawierającej dłuższe włókna.

4. Wnioski

Na podstawie badań polimerobetonów wzmocnianych pociętymi włóknami szklanymi i zawierającymi odpadowe szkło kineskopowe, można sformułować następujące wnioski:

- Urabialność masy polimerobetonowej ulega pogorszeniu, w przypadku zawartości włókien szklanych o długości 12 mm, co później przejawia się prawdopodobnie powstawaniem pustek w materiale. O relatywnie znacznym udziale pustek świadczy większa porowatość otwarta i nasiąkliwość materiału, w porównaniu z pozostałymi badanymi próbkami. Pustki, z kolei negatywnie wpływają, szczególnie na wytrzymałość na ściskanie.
- Największą spośród badanych materiałów wytrzymałość na ściskanie wynoszącą 99.2 MPa, miał beton z 1% dodatkiem włókien szklanych, o długości 4.5 mm. Pozostałe betony zawierające włókna – 3% włókien 4.5 mm oraz 1% i 3% włókien 12 mm – wykazały wytrzymałość na ściskanie o 17% gorszą, niż polimerobeton niezawierający włókien.
- Dodatek włókien powoduje wzrost wytrzymałości polimerobetonu na zginanie. Największą wytrzymałość na zginanie wynoszącą 44.2 MPa, miał polimerobeton z 3% dodatkiem objętościowym włókien szklanych, o długości 4.5 mm. Jest to o 26% więcej, niż wykazał polimerobeton, bez włókien. Niewiele mniejszą wytrzymałość 41.2 MPa – o 18% więcej niż bez dodatku, wykazał beton zawierający 3% włókien 12 mm.
- Dodatek pociętych włókien szklanych zwiększa bezpieczeństwo konstrukcji, z polimerobetonu. Włókna chronią element z polimerobetonu przed gwałtownym rozpadem, w przypadku przekroczenia maksymalnej nośności, podczas zginania.
- Mielenie szkła kineskopowego jest możliwe w młynie krzyż-

from filling the voids between sand and ground glass grains with a short glass fiber. The addition of 12 mm long glass fibers, in turn, increases the open porosity and water absorption. It may be due to voids present inside the material due to the deterioration of the workability of the mass containing longer fibers.

4. Conclusions

Based on the research carried out for chopped glass fiber reinforced polymer concrete containing waste CRT glass, the following conclusions can be drawn:

- The workability of the polymer concrete mass deteriorates at the content of glass fibers with a length of 12 mm, which later manifests itself probably by the formation of voids in the material. The relatively high proportion of voids is evidenced by the greater open porosity and absorbability of the material, compared to the other samples. The voids in turn negatively affect the compressive strength in particular.
- The highest compressive strength of 99.2 MPa among the tested materials was demonstrated by concrete with 1% addition of glass fibers, 4.5 mm long. Other concretes containing fibers - 3% of 4.5 mm fibers and 1% and 3% of 12 mm fibers - showed compressive strength up to 17% worse than polymer concrete without fibers.
- The addition of fibers increases the flexural strength of polymer concrete. The highest flexural strength of 44.2 MPa was demonstrated by polymer concrete with 3% by volume of glass fibers, 4.5 mm long. This is 26% more than is shown in polymer concrete without fibers. A slightly lower strength of 41.2 MPa [18% more than control concrete] was demonstrated by concrete reinforced with 3% 12mm fibers.
- The addition of chopped glass fibers increases the safety of the polymer concrete structure. The fibers protect the polymer concrete element against rapid disintegration in the event of exceeding the maximum load capacity during bending.
- Milling of CRT glass is possible using a cross beater mill. The use of separation sieves with a hole size of 2.0 mm allows to obtain an average size of glass grains after milling 91 μm, which is the optimal size for combination with quartz sand.
- CRT glass milled to a particle size of 91 μm works very well as a filler. It does not adversely affect either the technological process [workability] or the physical properties of the obtained polymer concrete. It also does not adversely affect the behavior of the materials during compression and bending tests.

kowo-bijakowym. Zastosowanie sit separacyjnych, o wielkości oczek 2.0 mm, pozwala uzyskiwać średnią wielkość ziaren szkła po zmieleniu wynoszącą 91 µm, co jest korzystną wielkością w porównaniu z piaskiem kwarcowym.

- Szkło kineskopowe, zmielone do cząstek o wielkości 91 mm daje bardzo dobre wyniki, jako wypełniacz. Nie wpływa negatywnie ani na proces technologiczny – urabialność, ani na właściwości fizyczne, uzyskanego polimerobetonu. Nie wpływa też negatywnie na zachowanie materiałów podczas prób ściskania i zginania.
- Zastosowanie zmielonych szyb kineskopowych, do produkcji polimerobetonu, jest dobrą metodą zagospodarowania „problematicznego” odpadu.
- Porównując uzyskane wyniki badań można stwierdzić, że najlepsze wyniki daje włókno szklane o długości 4,5 mm, przy dodatku 1 – 3% objętościowych, do polimerobetonu zawierającego 30% objętościowych żywicy epoksydowej, pełniącej rolę „lepiszczą” oraz do mielonego szkła kineskopowego i piasku, zmieszanych w jednakowych stosunkach objętościowych.

Podziękowania

Badania zostały częściowo sfinansowane przez Katedrę Technologii Materiałowych Politechniki Śląskiej, w ramach statutowego projektu badawczego BK-209/RM3/2022 (11/030/BK_22/1082).

Literatura / References

1. Z. Jamróży, *Beton i jego technologie*, 4th ed., Warsaw, 2015.
2. D. Kruger, Recent developments in the use of polymer concrete. *Appl. Phys. Lett.* **95**, 233116 (2009).
3. E. Kirlikovali, Polymer/concrete composites—a review. *Polym. Eng. Sci.* **21**(8), 507–509 (1981).
4. M. Sautya, What is Polymer Concrete In Details And Their Types & Uses, *Civil Engineering*, www.civilnoteppt.com/what-is-polymer-concrete-in-details-and-their-types-and-uses/#Types_of_Polymer_Concrete (accessed 01 Apr 2022)
5. K. Ostad-Ali-Askari, V.P. Singh, N.R. Dalezios, Polymer concrete. *Int. J. Hydro.* **2**(5), 630–635 (2018). <https://doi.org/10.15406/ijh.2018.02.00135>
6. R. Bedi, R. Chandra, S.P Singh, Mechanical Properties of Polymer Concrete. *J. Comp.* **2013**, 948745 (2013). <http://doi.org/10.1155/2013/948745>
7. P. G. Asteris, H. Naseri, M. Hajihassani, On the mechanical characteristics of fibre reinforced polymer concrete. *Adv. Concr. Constr.* **12**(4), 271-282 (2021). <https://doi.org/10.12989/acc.2021.12.4.271>
8. V. Ráček, L. Kadlec, V. Křístek, Shear Characteristics of Fibre-Concrete. *Proc. Earth Planet. Sci.* **15**, 111-118 (2015). <https://doi.org/10.1016/j.proeps.2015.08.028>
9. M.A. Glinicki, Beton ze zbrojeniem strukturalnym. In *XXV Ogólnopolskie Warsztaty Pracy Projektanta Konstrukcji*, 279–308 (2010). Available online: <http://www.ippt.pan.pl/Repository/o70.pdf> (accessed 01 Apr 2022).
10. A.M. Brandt, *Cement Based Composites: Materials, Mechanical Properties and Performance*, London and New York (2009).
11. T. Ponikiewski, Wpływ włókien na właściwości reologiczne zapraw cementowych, V Seminarium reologiczne, Gliwice, 2003.

- The use of milled CRT glass in the production of polymer concrete is an effective method of managing the problematic waste.
- Comparing the obtained test results, it can be concluded that it is most advantageous to use a glass fiber with a length of 4.5 mm, in a volume of 1 - 3%, for polymer concrete containing 30% by volume of epoxy resin acting as a binder and for ground CRT glass and sand, mixed in an equal volume ratio.

Acknowledgements

The study was partially financed by Department of Materials Technologies at Silesian University of Technology, in a frame of the BK-209/RM3/2022 (11/030/BK_22/1082) statutory research project.

12. T. Singh Ahuja, A. Panwar, Glass Fibre Reinforcements in Concrete. *Int. J. Sci. Res.* **5**(3), 2051 - 2055 (2016).
13. G. Martínez-Barrera, E. Viguera-Santiago, O. Gencel, Polymer concretes: a description and methods for modification and improvements. *J. Mater. Educat.* **33**(1-2), 37-52 (2011).
14. X. Xie, X. Zhang, Y. Jin, Research Progress of Epoxy Resin Concrete. *Earth Environ. Sci.* **186**, 012038, (2018). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/186/2/012038>
15. J. M. L. Reis, Fracture and flexural characterization of natural fiber-reinforced polymer concrete. *Constr. Build. Mater.* **20**(9), 673-678 (2006). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2005.02.008>
16. N. Saba, M. Jawaid, O.Y. Allothman, M.T. Paridah. A review on dynamic mechanical properties of natural fibre reinforced polymer composites. *Constr. Build. Mater.* **106**: 149-159 (2016). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.12.075>
17. L. Mohammed, M.N.M. Ansari, G. Pua, M. Jawaid, M. Saiful Islam. A review on natural fiber reinforced polymer composite and its applications. *Int. J. Polym. Sci.* **2015**, 243947 (2015). <https://doi.org/10.1155/2015/243947>
18. Q. Wang, Y. Ding, Y. Zhang, C. Castro. Effect of macro polypropylene fiber and basalt fiber on impact resistance of basalt fiber-reinforced polymer-reinforced concrete. *Struct. Concr.* **22**(1), 503-515 (2021). <https://doi.org/10.1002/suco.201900482>
19. A. Kheyroddin, H. Arshadi, J. Salehzade. Impact Behavior of Fiber-Reinforced Concrete with Polypropylene Fibers and Carbon Fiber-Reinforced Polymers. *J. Test. Evaluat.* **49**(6), 5433-5438 (2021). <https://doi.org/10.1520/JTE20200670>
20. T. C. Madhavi, L.S. Raju, D. Mathur. Polypropylene fiber reinforced concrete-a review. *IJETAE* **4**(4), 114-118 (2014).
21. S. Mebarkia, C. Vipulanandan. Compressive behavior of glass-fiber reinforced polymer concrete. *J. Mater. Civil Eng.* **4**(1), 91-105 (1992). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0899-1561\(1992\)4:1\(91\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(1992)4:1(91))
22. Y. Kitane, A. J. Aref, G. C. Lee. Static and Fatigue Testing of Hybrid Fiber-Reinforced Polymer-Concrete Bridge Superstructure. *J. Compos. Constr.* **8**(2), 182-190 (2004). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0268\(2004\)8:2\(182\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0268(2004)8:2(182))
23. W. Bai, J. Zhang, P. Yan, X. Wang, Study on vibration alleviating properties of glass fiber reinforced polymer concrete through orthogonal tests. *Mater. Des.* **30**(4), 1417-1421 (2009). <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2008.06.028>.
24. E.B. Jeon, S.K. Ahn, I.G. Lee, H.I. Koh, J. Park, H.S. Kim. Investigation of mechanical/dynamic properties of carbon fiber reinforced polymer concrete for low noise railway slab. *Comp. Struct.* **134**, 27-35 (2015) <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2015.08.082>
25. S.F. Brena, R.M. Bramblett, S.L. Wood, M.E. Kreger. Increasing flexural capacity of reinforced concrete beams using carbon fiber-reinforced polymer composites. *Struct. J.* **100**(1), 36-46 2003. <https://doi.org/10.14359/12437>
26. T. Gawenda, Z. Naziemiec, A. Walerak. Badania wybranych właściwości kruszyw z odpadów ceramicznych oraz betonu wytworzonego z ich udziałem. *Ann. Set Env. Protect.* **15**, 2003-2021 (2013).
27. B. Witkowski, A. Pietrzak, Wpływ odpadowej stłuczki kineskopowej na wybrane właściwości zaprawy cementowej, *Zeszyty Naukowe Politechniki Częstochowskiej* **24**, 373-376 (2018).
28. A. Pietrzak, M. Ulewicz, Wpływ odpadów z kineskopowej stłuczki szklanej (CRT) na parametry wytrzymałościowe zapraw cementowych, *Mater. Bud.* **10**, 49-50 (2017).
29. H.Zhao, C.S.Poon, T.-C. Ling, Utilizing recycled cathode ray tube funnel glass sand as river sand replacement in the high-density concrete. *J. Clean. Prod.* **51**, 184-190 (2013). <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.01.025>
30. D. Grdić, I. Despotović, N. Ristić, Z. Grdić, G. Topličić Curčić, Potential for Use of Recycled Cathode Ray Tube Glass in Making Concrete Blocks and Paving Flags. *Materials* **15**(3), 1499 (2022). <https://doi.org/10.3390/ma15041499>
31. C. Poon, Management of CRT glass from discarded computer monitors and TV sets. *Waste Managem.* **28**(9), 1499 (2008).
32. K. Mrowiec, S. Kubica, H. Kuczyńska, Recykling odpadowego szkła kineskopowego, *Chemik* **65** (11): 1212-1217 (2011).
33. F. Andreola, L. Barbieri, A. Corradi, I. Lancellotti, Cathode ray tube glass recycling: An example of clean technology, *Waste Manag. Res.* **23**, 314 - 321 (2005). <https://doi.org/10.1177/0734242X05054422>
34. M. I. Marcus, Deak Gy, F. D. Dumitru, M. A. Moncea, A. M. Panait, C. Maria, Recycling of CRT glass in plastering mortars, *Mater. Sci. Eng.* **572**, 012076 (2019). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/572/1/012076>
35. D. Grdić, N. Ristić, G. Topličić - Curčić, D. Krstić, Practical use of waste crt glass for making of concrete prefabricated products, V International Symposium for Students of Doctoral Studies in the Fields of Civil Engineering, 2019.
36. C. Tsamo, E-Waste Assessment in Cameroon. Case study: Town of Maroua. *Int. J. Chem. Tech. Res.* **6**, 681-90 (2014).
37. H. H. Abdeen, S. M. Shihada, Properties of Fired Clay Bricks Mixed with Waste Glass. *J. Sci. Res. Rep.* **13**, 1-9 (2017).
38. P. N. Djomou Djonga, C. Tsamo, H. Massai, Influence of CRT Glass Quantity on the Properties of Red Mud-CRT Glass Ceramics Fired at Different Temperatures, *J. Mater. Sci. Eng. B* **9**(7-8), 133-143 (2019). <https://doi.org/10.17265/2161-6221/2019.7-8.002>
39. D.Z. Grdić, G.A. Topličić-Curčić, Z.J. Grdić, N.S. Ristić, Durability Properties of Concrete Supplemented with Recycled CRT Glass as Cementitious Material. *Materials* **14**, 4421 (2021).
40. N. N. M. Pauzi, A. Z. Abidi, M. F. M. Zain, Characterization of Spherical Waste CRT Glass as Aggregates in Concrete. *IJAREI* **2**(3), 1-11 (2020).
41. F. D. Dumitru, A. M. Panait, M. A. Moncea, A. G. Baraitaru, M. V. Olteanu, I. Marcus, P. I. Gheorghe, G. Deák, M. F. M. Tahir, Microstructural characterization of plastering mortars with CRT glass addition, *AIP Conference Proceedings* **2291**, 020020 (2020). <https://doi.org/10.1063/5.0023389>
42. P. Pozzi, Effect of particles size of CRT glass waste on properties of polymer concrete. *Env. Eng. Manag. J.* **17** (10): 2447-2453 (2018).
43. B. Malchiodi, C. Siligardi, P. Pozzi, Unsaturated Polyester Based Polymer Concrete Containing Recycled Cathode Ray Tube Glass Aggregate. *J. Comp. Sci.* **6**, 47 (2022). <https://doi.org/10.3390/jcs6020047>
44. K. Mrowiec, S. Kubica, H. Kuczyńska. Recykling odpadowego szkła kineskopowego. *Chemik* **65**(11) 1212-1217 (2011).
45. N. Menad. Cathode ray tube recycling. *Res. Conserv. Recycl.* **26**(3-4), 143-154 (1999). [https://doi.org/10.1016/S0921-3449\(98\)00079-2](https://doi.org/10.1016/S0921-3449(98)00079-2)
46. C.S. Poon. Management of CRT glass from discarded computer monitors and TV sets. *Waste Manag.* **28**(9), 1499, (2008). <https://doi.org/10.1016%2Fj.wasman.2008.06.001>
47. H. Mehdipour, P. P. Camanho, G. Belingardi. Elasto-plastic constitutive equations for short fiber reinforced polymers. *Compos. B*, **165**, 199-214 (2019). <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.11.106>
48. A.I. Selmy, A. R. Elsesi, N. A. Azab, M. A. Abd El-baky. In-plane shear properties of unidirectional glass fiber (U)/random glass fiber (R)/epoxy hybrid and non-hybrid composites. *Compos. B.* **43**(2), 431-438 (2012). <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2011.06.001>

49. P. N. Shakor, S. S. Pimplikar: Glass Fibre Reinforced Concrete Use in Construction. *Int. J. Techn. Eng. Syst.* **2**(2), (2011).

50. B. Bienias, W. Michalski, B. Mielan, K. Pietryga, E. Pamuła, M. Wasek: Evaluation of mechanical properties of poly(methyl methacrylate) reinforced with glass fibers. *Protetyka Stomatologiczna*, **68**(1), 3-15 (2018). <https://doi.org/10.5604/01.3001.0011.6803>