

Wpływ infiltracji próżniowej na właściwości mechaniczne polimerobetonów wzmocnianych lekkimi kruszywami ceramicznymi

Influence of vacuum infiltration on mechanical properties of polymer concrete filled with lightweight ceramic aggregates

Jakub Smoleń^{1*}, Tomasz Pawlik¹

¹Faculty of Materials Science, Silesian University of Technology, Krasińskiego 8, Katowice, 40-019, Poland

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

Streszczenie

W niniejszej pracy opisano wpływ infiltracji próżniowej na właściwości polimerobetonów na bazie lekkich agregatów ceramicznych. W pierwszym etapie badań wytworzono ceramiczne granule o wysokiej porowatości otwartej, około 27%, w oparciu o wykorzystanie przemysłowych materiałów odpadowych. Ceramiczne agregaty, zwane dalej granulami, o wielkości od 2 do 4 mm wytworzono z wykorzystaniem zanieczyszczonej stłuczki szklanej oraz łupków węglowych. Omówiono efektywność infiltracji granulatu żywicą epoksydową w produkcji polimerobetonu o wysokiej wytrzymałości mechanicznej i stosunkowo małej masie w porównaniu z tradycyjnym betonem. Wytrzymałość na ściskanie polimerobetonu w którym kruszywo infiltrowano próżniowo żywicą wynosi 87 MPa, a polimerobetonu w którym zastosowano infiltrację zanurzeniową wytrzymałość na ściskanie wynosi około 42 MPa. Powstały polimerobeton, ze względu na swoją gęstość, zaliczany jest do betonów lekkich o wysokiej wytrzymałości.

Słowa kluczowe: polimerobeton, kompozyty, recykling, lekkie agregaty ceramiczne

Summary

In this paper, the influence of vacuum infiltration of lightweight ceramic aggregates as fillers in polymeric concretes was described. In the first stage of the investigation, a set of ceramic aggregates with a high open porosity of about 27% was produced on the basis of industrial wastes. Ceramic aggregates with a size of 2 to 4 mm, hereinafter referred to as granules, were produced using contaminated glass cullet waste and coal shale. The effectiveness of granule infiltration with epoxy resin in the production of polymer concrete with high mechanical strength and relatively low mass compared to traditional concrete was discussed. The compressive strength of polymer concrete, where the aggregates were infiltrated with resin, is 87 MPa, and the polymer concrete, in which the vacuum infiltration process was not used, reaches a compressive strength of approximately 42 MPa. The resulting concrete, due to its density, is classified as a lightweight high-strength concrete.

Keywords: polymer concrete, composites, recycling, lightweight ceramic aggregate (LWA)

1. Wprowadzenie

Lekkie kruszywa ceramiczne [Rys. 1], znane również w literaturze jako kruszywa lekkie [LWA, z ang. *lightweight aggregates*], stanowią szeroką grupę porowatych materiałów ceramicznych. Lekkie kruszywa ceramiczne w rozumieniu Choudhry'ego i Hadleya (1) to materiały, których masa jednostkowa jest mniejsza o około 40-60% w porównaniu do standardowych kruszyw. Lekkie kruszywa ceramiczne występują w postaci naturalnej, m.in. perlit, ziemia okrzemkowa, pumeks, wermikulit, scoria i tuf lub w postaci syntetycznej (2-3). Syntetyczne kruszywa lekkie powstają z mieszanin

1. Introduction

Lightweight ceramic aggregates [Fig. 1], also known in the literature as lightweight aggregates [LWA] or lightweight expanded clay aggregates [LECA], are a wide group of porous ceramic materials. Lightweight ceramic aggregates, as defined by Choudhry and Hadley (1), are materials whose density are reduced by about 40-60% compared to standard aggregates. Lightweight ceramic aggregates occur in a natural form, e.g. perlite, diatomite, pumice, vermiculite, scoria, and tuff or in a synthetic form (2-3). Synthetic LWAs are made from mixtures of raw materials that expand in the sintering process at high temperature [950-1350°C] (4-5).

surowców, które pęcznią w procesie spiekania w wysokiej temperaturze [950-1350°C] (4-5).

Surowce do produkcji LWA podczas ogrzewania wydzielają gazy do momentu początku topnienia i tworzenia się fazy ciekłej, która posiada odpowiednią lepkość zapewniającą zatrzymanie gazów w mikrostrukturze materiału (5-7). Surowce po rozdrobnieniu tworzą plastyczną masę, z której formuje się granule, a następnie spieka je w piecu obrotowym. Proces produkcji jest bardzo prosty i pozwala na wykorzystanie wielu rodzajów surowców, często odpadów. Produkcja lekkich kruszyw z surowców odpadowych pozwala na efektywne zagospodarowanie popiołów lotnych (8-10), osadów ściekowych (11-13), szkła (14-15) i innych (16-17).

Lekkie kruszywa ceramiczne są niepalne, obojętne chemicznie, posiadają bardzo dobre właściwości z punktu widzenia izolacji termicznej i akustycznej, są tanie i łatwo dostępne. Ze względu na korzystny zestaw właściwości i potencjalnie dużą wytrzymałość znajdują szerokie zastosowanie w ogrodnictwie ze względu na możliwość wchłaniania i zatrzymywania wilgoci w strefie korzeniowej oraz w budownictwie, zwłaszcza przy produkcji betonu lekkiego, pustaków ściennych i stropowych oraz materiałów izolacyjnych (18-20, 36).

Zastosowanie lekkich kruszyw ceramicznych w produkcji betonu jest skuteczną metodą na zmniejszenie ciężaru konstrukcji. Zastąpienie kruszyw, takich jak żwir, czy piasek, kruszywem lekkim zmniejsza gęstość betonu i poprawia jego izolacyjność termiczną (21). Wstępnie zwilżone kruszywo lekkie może z powodzeniem częściowo zastąpić bazalt w betonach wysokowartościowych poddanych działaniu mrozu w obecności soli odładzających. Ponadto zastąpienie bazaltu przez lekkie kruszywo jest bardziej ekonomiczne ze względu na ograniczenia wynikające ze stosowania dodatków napowietrzających, które są drogie i trudne w dozowaniu na placu budowy (22). Kim i in. (23) wykazali, że dodatek kruszywa lekkiego zwiększa urabialność masy oraz stwierdzono, że większą wytrzymałość betonu uzyskuje się, gdy porowatość są skoncentrowane w kruszywie niż te zlokalizowane w osnowie cementowej. Duża liczba publikacji naukowych potwierdza spadek wytrzymałości mechanicznej, zwłaszcza na ściskanie, w przypadku zastąpienia tradycyjnych kruszyw lekkimi kruszywami ceramicznymi (24-26). Rashad (21) zwraca uwagę, że spadek wytrzymałości na ściskanie może wynieść około 40% w przypadku zastosowania lekkiego kruszywa jako kruszywa grubego, a w przypadku zastosowania jako kruszywa grubego i drobnego spadek może wynieść nawet 56%.

Betony z kruszywem lekkim posiadają zwiększoną nasiąkliwość, zmniejszoną odporność na penetrację chlorków oraz zmniejszoną mrozoodporność (27-28). Alternatywnym rozwiązaniem dla tradycyjnych betonów konstrukcyjnych są betony polimerowe, w których funkcję spoiwa cementowego przejmuje żywica. Beton polimerowy charakteryzuje się znacznie mniejszą nasiąkliwością oraz lepszą odpornością na czynniki chemiczne i zmiany temperatury. Ponadto polimerobeton szybciej osiąga pełną wytrzymałość, jest bardziej odporny na zużycie erozyjne i ma wyższą wytrzymałość mechaniczną (29-30).



Rys. 1. Lekkie kruszywo ceramiczne [LWA], frakcja 4 - 8 mm

Fig. 1. Lightweight ceramic aggregates [LWA], fraction 4-8 mm

Raw materials for the production of LWA emit gases during heating to the beginning of melting and the formation of a melt that has a proper viscosity that ensures the retention of gases in the microstructure of the material [creation of open and closed porosity] (5-7). After crushing, the raw materials form a soft plastic mass which is formed into granules and then sintered in a rotary kiln (type of furnace with rotary chamber). The production process is very simple and allows the use of many types of raw materials, often waste materials. The waste-based production of LWA allows the effective management of fly ashes (8-10), sewage sludge (11-13), glass (14-15), and others (16-17).

Lightweight ceramic aggregates are nonflammable, chemically inert, have very good thermal and acoustic insulation properties, are inexpensive, and easily available. Due to the favourable set of properties and potentially high specific strength, they are widely used in horticulture due to the possibility of absorbing and retaining moisture in the root zone, and in construction, especially in the production of lightweight concrete, wall and ceiling hollow bricks and insulating materials (18-20, 36).

The use of lightweight ceramic aggregates in the production of lightweight concrete is an effective method of reducing the weight of the structure. Replacing aggregates such as gravel or sand with LWA lowers the density of concrete and improves its thermal insulation (21). Pre-wetted lightweight aggregate can very successfully partially replace basalt in concretes resistant to scaling in the presence of de-icing salts. Furthermore, basalt replacement by LWA is more economical with respect to air-entraining additives, which are expensive and difficult to control on the construction site (22). In the publication by Kim et al. (23), it was shown that the addition of LWA increases the workability of the mass and it was found that a higher concrete strength is obtained when porosities are concentrated in the aggregate than in the cement matrix. A large number of scientific publications confirm a decrease in mechanical strength, especially compressive strength, when traditional aggregates are

Niniejsza praca koncentruje się na ocenie korzyści płynących z zastosowania lekkich kruszyw ceramicznych (LWA) w technologiach polimerobetonu. Kruszywa ceramiczne są w całości wykonane z materiałów odpadowych, z których najważniejszymi są łupki węglowe i zanieczyszczona stłuczka szklana. Proces infiltracji zanurzeniowej porównano z infiltracją próżniową. Oczekuje się uzyskania kompozytowego materiału budowlanego, który łączy w sobie zalety betonu lekkiego [mała gęstość połączona z wysoką wytrzymałością mechaniczną, izolacyjnością termiczną i akustyczną] z zaletami betonu polimerowego: wysoką wytrzymałością, niską nasiąkliwością, odpornością na czynniki chemiczne, odpornością na zmiany temperatury. Dodatkowym atutem pracy jest zagospodarowanie odpadów przy produkcji LWA.

2. Część doświadczalna

2.1. Materiały

Do przygotowania kruszywa zastosowano łupki przywęglowe i zanieczyszczoną stłuczkę szklaną według składu podanego w tabelicy 1. Średnia wielkość ziarna wynosiła **100 - 200 μm** . Ustalono, że w celu uzyskania optymalnego kształtu i wielkości granulek należy zwiększyć wilgotność mieszaniny do około 10% przez odpowiedni dodatek wody destylowanej.

W celu uzyskania polimerobetonu zawierającego lekkie kruszywa ceramiczne zastosowano żywicę epoksydową LH 288 [Havel Composites, Czechy] oraz utwardzacz H 505 [Havel Composites, Czechy]. Stosunek masowy żywicy i utwardzacza wynosi 100:27.

2.2. Metody

Lekkie kruszywa ceramiczne wytworzono w wieloetapowym procesie. W pierwszym etapie zestawiono surowce według zaplanowanego składu i uzyskano wilgotność poprzez odpowiedni dodatek wody. Przygotowaną jednorodną mieszaninę składników umieszczono w mieszalniku granulującym w celu zwiększenia wielkości granulek. Po procesie granulacji granule suszono w suszarce laboratoryjnej przez 24 godziny w temperaturze 120°C. Spiekanie w piecu obrotowym prowadzono przez 15 minut w temperaturze około 1000°C.

Na otrzymanych granulach prowadzono infiltrację zanurzeniową i infiltrację próżniową przez 10 minut od momentu dodania utwardzacza do żywicy, następnie pozostawiono granulki na sitach w celu usunięcia nadmiaru żywicy. Dla otrzymanych kruszyw określono porowatość otwartą, gęstość pozorną i nasiąkliwość.

Lekkie kruszywa ceramiczne powlekane żywicą wykorzystano następnie do produkcji lekkich polimerobetonów, w których udział objętościowy granulatu wynosi około 60%. Granule homogenizowano w ciekłej żywicy i odlewano do form. Utwardzone polimerobetonu po 72h umieszczano w temperaturze 60°C na 12h w celu dotwardzenia. Określono wytrzymałość na ściskanie, zgodnie z normą PN-EN ISO 604:2006 dla polimerów oraz przeprowadzono próbę zginania trójpunktowego, zgodnie z normą PN-EN ISO 14125 dla

replaced by lightweight ceramic aggregates (24-26). Rashad in the publication (21) points out that the decrease in compressive strength can be about 40% if lightweight aggregate is used as coarse aggregate, and in the case where LWA is used as coarse and fine aggregate, then the decrease can be up to 56%.

Lightweight aggregate concretes have increased water absorption, reduced resistance to chloride penetration and reduced freeze/thaw resistance (27-28). An alternative solution to traditional structural concretes is polymer concrete, where the function of the cement binder is taken over by the resin. Polymer concretes have significantly lower water absorption and better resistance to chemical agents and temperature changes. Furthermore, polymer concretes reach full strength faster, are more resistant to erosive wear, and have higher mechanical strength (29-30).

This work is focused on the assessment of the benefits of using lightweight ceramic aggregates [LWA] in polymer concrete technologies. The ceramic aggregates are entirely made of waste materials, the most important of which are coal shales and contaminated glass cullet. The immersion infiltration process was compared to vacuum infiltration to produce the test materials. It is expected to obtain a composite building material that combines the advantages of lightweight concrete: low density combined with high mechanical strength, thermal and acoustic insulation, with the advantages of polymer concrete: high mechanical strength, low water absorption, resistance to chemical agents, resistance to temperature changes. An additional advantage of the work is the management of waste in the production of LWA.

2. Experimental

2.1. Materials

The coal shales and the contaminated glass cullet were weighed according to the composition in Table 1. The average grain size was 100 - 200 μm . It was established that in order to obtain the optimal shape and size of the granules, the moisture content of the mixture should be increased to about 10% by the appropriate addition of distilled water.

In order to obtain polymer concrete containing lightweight ceramic aggregates, epoxy resin LH 288 [Havel Composites, Czech Republic] and hardener H 505 [Havel Composites, Czech Republic] were used. The mass ratio of resin and hardener is 100:27.

Tablica 1 / Table 1


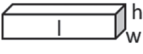
SKŁAD SUROWCOWY LEKKICH KRUSZYW CERAMICZNYCH
COMPOSITIONS OF LIGHTWEIGHT CERAMIC AGGREGATES RAW MIX

Składnik / Component	Zawartość / Content, %
Łupki przywęglowe / Coal shale	70.0
Zanieczyszczona stłuczka szklana Contaminated glass cullet	30.0

Tablica 2 / Table 2

WYMIARY PRÓBEK

DIMENSIONS OF THE SAMPLES

Rodzaj badania / Test	Kształt / Shape	Szerokość / Width, mm	Długość / Length, mm	Wysokość / Height, mm
Wytrzymałość na ściskanie Compressive strength		50	X	100
Wytrzymałość na zginanie Flexural strength		50	200	25

kompozytów polimerowych. Wymiary próbek podano w tablicy 2. W obu badaniach szybkość odkształcania wynosiła 10 mm/min.

3. Wyniki

Podczas infiltracji dochodziło do intensywnego wydzielania się pęcherzyków powietrza, co potwierdza, że żywica o lepkości dynamicznej około 500 cP wypełnia pory na powierzchni materiału. Planując proces infiltracji kruszywa lekkiego należy wziąć pod uwagę lepkość żywicy – im mniejsza lepkość tym lepsza penetracja, czas żelowania układu z uwzględnieniem temperatury i objętości oraz ciśnienie w komorze próżniowej. W badaniach wykorzystano żywicę epoksydową o czasie żelowania około 30 minut w objętości 250 cm³. Czas infiltracji ustalono na 10 minut, aby nie przekroczyć czasu żelowania. W tym czasie nie następuje istotna zmiana temperatury układu sieciującego, co korzystnie wpływa na powtarzalność i przewidywalność procesu technologicznego.

Porowatość otwartą, nasiąkliwość i gęstość pozorną wyznaczono metodą Archimedesusa, a wyniki przedstawiono na rys. 2. Uzyskane wyniki wskazują na duże zróżnicowanie wartości pomiędzy próbkami referencyjnymi [LWA], próbkami infiltrowanymi zanurzeniowo przy normalnym ciśnieniu atmosferycznym i próbki infiltrowanymi próżniowo w komorze. Porowatość otwarta impregnowanego kruszywa wynosiła około 27%. Zastosowanie infiltracji zanurzeniowej zmniejszyło porowatość otwartą do 17%, a zastosowanie infiltracji próżniowej zmniejszyło porowatość do 1,2%. Zmniejszenie porowatości otwartej jest korzystne i ma bezpośredni wpływ na wchłanianie wody. Dla badanego kruszywa absorpcja wody wynosiła 16%, a dla granul infiltrowanych próżniowo absorpcja wody wynosiła 0,65%. Zmniejszenie porowatości otwartej oraz ograniczenie wchłaniania wody przyczynia się do zwiększenia odporności materiału na korozję, agresywne chemikalia oraz zmienne cykle temperaturowe zamrażania i rozmrażania. Można przypuszczać, że infiltracja próżniowa znacznie zwiększa żywotność kruszywa lekkiego i odporność na niekorzystne oddziaływanie środowiska. Wypełnienie otwartych porowatości zwiększa masę granul, jak pokazano na wykresie gęstości pozornej [rys. 2c]. Gęstość pozorna ziaren wzrasta z 1,69 do 1,95 g/cm³ po infiltracji próżniowej.

Różnice w porowatości otwartej i absorpcji wody zanotowane między serią próbek infiltrowanych zanurzeniowo i serią próbek

2.2. Methods

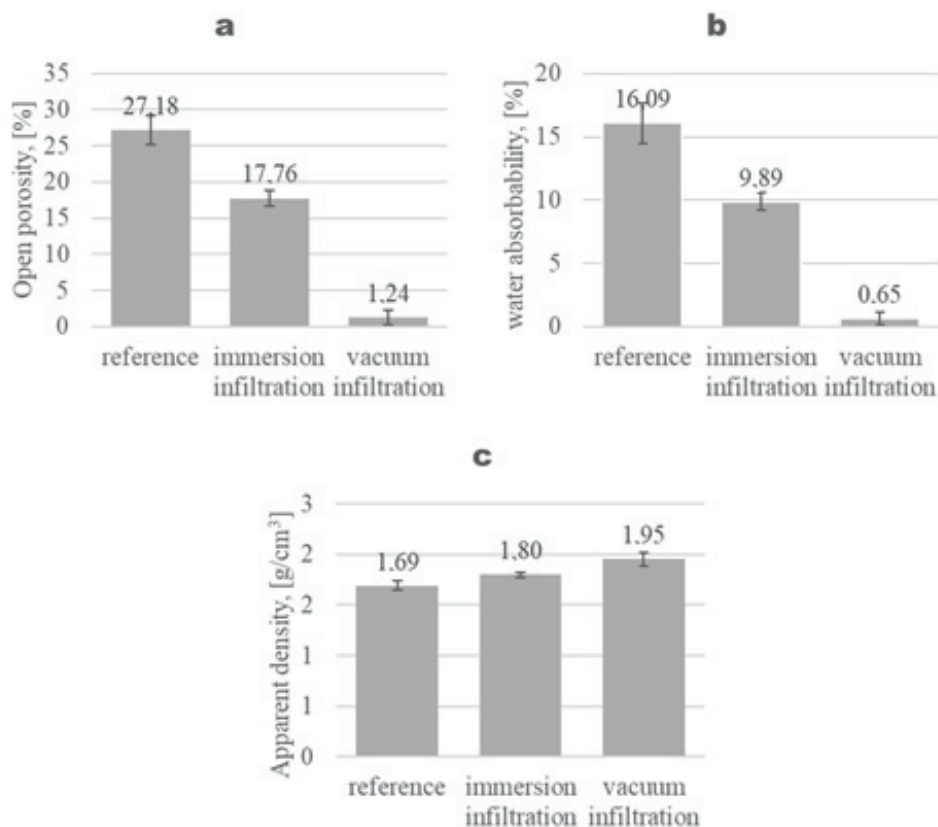
Lightweight ceramic aggregates were produced in multistage process. In the first stage, raw materials were compiled according to the planned composition and moisture was obtained by appropriate addition of water. The prepared homogeneous mixture of ingredients was placed in an intensive mixer [Eirich TR04] and the granulation process was carried out. The granules were then placed on a granulation plate to increase the size of the round shaped granules. After the granulation process, LWA was dried in a laboratory oven for 24 hours at a temperature of 120°C. Sintering in a rotary furnace was carried out for 15 minutes at a temperature of about 1000°C.

Immersion infiltration and vacuum infiltration were performed on the obtained granules for 10 minutes from the time the hardener was added to the resin, then the granules were left on the sieves to remove excess resin. Open porosity, apparent density and water absorption were determined on the obtained LWA.

Lightweight ceramic aggregates coated with resin were then used to produce lightweight polymer concretes, where the volume fraction of granules was about 60%. The granules were homogenized in liquid resin and cast into moulds. Cured polymer concretes after 72h were placed at 60°C for 12h for post curing reaction. The compressive strength of the obtained polymer concretes was determined (in accordance with the PN-EN ISO 604:2006 standard for polymers) and a three-point bending test was carried out (in accordance with the PN-EN ISO 14125 standard for polymer composites). The dimensions of the samples are included in Table 2. For both tests, the strain rate was 10 mm/min.

3. Results

During the infiltration, the granules secreted air bubbles, which confirms that the resin with a dynamic viscosity of about 500 cP fills the pores on the surface of the material. When planning the LWA infiltration process, it is important to take into account the viscosity of the resin [the lower the viscosity, the better the penetration], the gel time of the system [taking into account temperature and volume] and the pressure in the vacuum chamber. In the tests, an epoxy resin with a gel time of about 30 minutes in a volume of 250 cm³ was used, therefore, in order not to exceed the gel time,



Rys. 2. Porowatość otwarta (a), nasiąkliwość (b) i gęstość pozorna (c) badanych materiałów

Fig. 2. Open porosity (a), water absorption (b) and apparent density (c) of investigated materials

infiltrowanych próżniowo wynikają z głębokości porów, na jakie żywica wnika w ciągu 10 min. Normalne ciśnienie atmosferyczne pozwala na częściowe wypełnienie porów, ale głębsze obszary pozostają niewypełnione. Różnica ciśnień między ciśnieniem atmosferycznym, a ciśnieniem wewnątrz pustych obszarów umożliwia właczanie żywicy w głębokie obszary. Schemat penetracji granulatu przez płynną żywicę przedstawiono na rys. 3. Ciśnienie atmosferyczne umożliwia penetrację żywicy w porowatości, przyczyniając się do procentowego zmniejszenia porowatości otwartej i zmniejszenia absorpcji wody [rys. 3b]. Zastosowanie próżni pozwala na penetrację głębokich porów i pozostawienie w tych miejscach większej ilości żywicy [rys. 3c], co przekłada się na większą gęstość materiału. Wnikanie żywicy w porowatą strukturę ceramiczną korzystnie wpływa na wytrzymałość mechaniczną, ponieważ porowata mikrostruktura ceramiczna zyskuje dodatkowe wzmocnienie polimerowe. W ten sposób lokalnie tworzony jest kompozyt polimerowy wzmocniony pianką ceramiczną.

Wytrzymałość na ścislenie [rys. 4a] i zginanie [rys. 4b] wykazały istotnie lepsze właściwości otrzymanego lekkiego polimerobetonu w porównaniu do tradycyjnego betonu cementowego. Próbkę betonu zostały wykonane w celach porównawczych i przebadane takimi samymi metodami jak polimerobeton. Wytrzymałość na ścislenie próbek z granulatem infiltrowanym zanurzeniowo wynosi około 40 MPa, a proces infiltracji próżniowej znacznie zwiększa wytrzymałość na ścislenie do około 90 MPa. Tradycyjny beton badany w tych samych warunkach osiąga wytrzymałość na ścislenie około 15 MPa. Wytrzymałość na zginanie polimerobetonu z granulatem

the infiltration time was set at 10 minutes. During this time, there is no significant temperature change of the cross-linking system, which is beneficial for the repeatability and predictability of the technological process.

The open porosity, water absorption, and apparent density were determined using the Archimedes method. Results are reported in Fig. 2. The obtained results show large variations in values between reference samples [LWA], immersion infiltrated samples, at normal atmospheric pressure, and vacuum infiltrated samples using a vacuum chamber. The open porosity of LWA was about 27%. The use of immersion infiltration reduced open porosity to 17%, and the use of vacuum infiltration reduced the porosity to 1.2%. Reducing the open porosity is beneficial and has a direct impact on water absorption. For LWA, the water absorption is 16%, and for the vacuum infiltrated sample, the water absorption is 0.65%. Reducing open porosity and reducing water absorption contribute to increasing the material resistance to corrosion, aggressive chemicals, and changing temperature cycles [freezing and thawing]. It can be assumed that vacuum infiltration significantly increases the life of LWA and resistance to adverse environmental impacts. Filling the open porosities increases the mass of the granules, as shown in the apparent density plot [Fig. 2c]. The apparent density of LWA increases from 1.69 to 1.95 g/cm³ after vacuum infiltration.

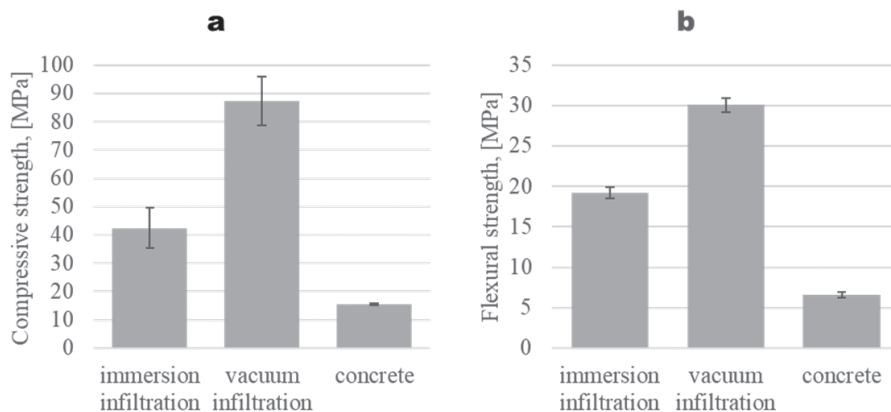
Differences in open porosity and water absorption found between a series of immersion-infiltrated samples and a series of vacuum-infiltrated samples result from the pore depth that the resin penetrates

infiltrowanym zanurzeniowo wynosi około 20 MPa, z granulatem infiltrowanym próżniowo około 30 MPa, a dla betonu tradycyjnego około 5 MPa. Polimerobeton pękał podczas zginania, przecinając granulaty poprzecznie [rys. 5], co jest zjawiskiem korzystnym. Materiał nie pęka na granicy międzyfazowej, co oznacza, że połączenie żywicy epoksydowej [osnowy] z powierzchnią ceramiczną [zbrojenie] jest bardzo dobre. Naprężenia zewnętrzne są przenoszone z osnowy na zbrojenie [rusztowanie ceramiczne]. Infiltracja próżniowa zapewnia większą powierzchnią międzyfazową niż infiltracja zanurzeniowa, co bezpośrednio wpływa na uzyskiwanie większej wytrzymałości. Podobny mechanizm wzmacniający stosowany jest w wielu materiałach kompozytowych, gdzie zastosowanie pianki ceramicznej poprawia właściwości mechaniczne (31-35). Otrzymany polimerobeton ma gęstość około 1750 kg/m³, co pozwala zaliczyć go do grupy betonów lekkich.

4. Wnioski

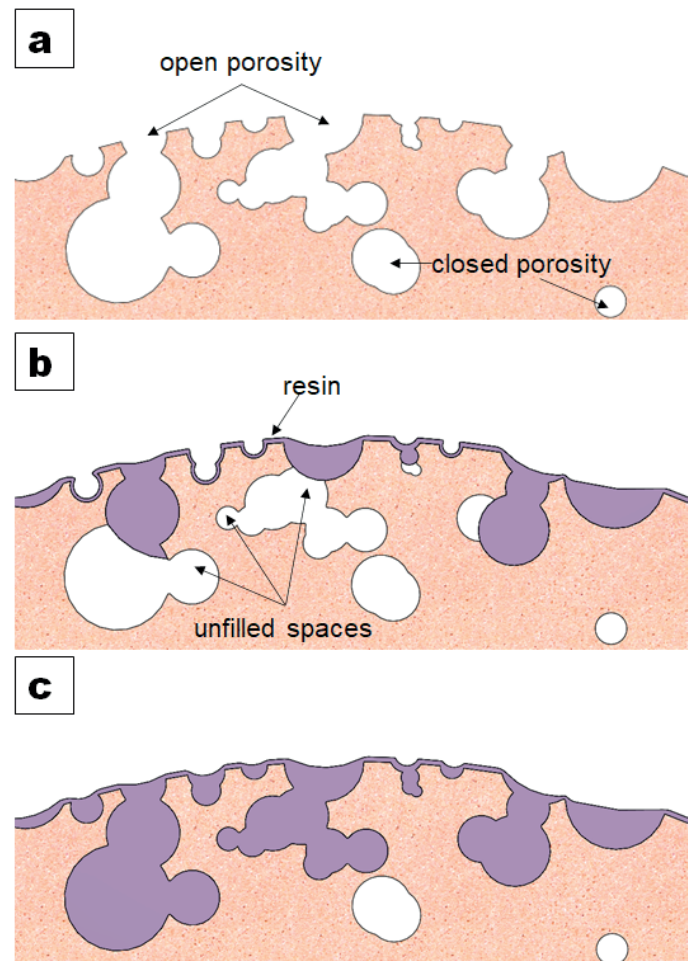
Przeprowadzone badania pozwalają stwierdzić, że:

- możliwa jest produkcja lekkich kruszyw ceramicznych na bazie surowców odpadowych, w tym odpadów zanieczyszczonych,
- polimerobeton wypełniony w 60% objętościowo lekkim kruszywem ceramicznym, ma gęstość około 1750 kg/m³ i należy do grupy betonów lekkich,
- infiltracja próżniowa jest skuteczniejsza niż infiltracja zanurzeniowa i pozwala na znaczne zmniejszenie porowatości otwartej, co pozytywnie wpływa na zmniejszenie nasiąkliwości, a co za tym idzie zwiększenie odporności na czynniki chemiczne i zapewnienie odporności na zmiany temperatury,
- infiltracja porowatych granул żywicą epoksydową jest efektywną metodą wytwarzania wytrzymałych mechanicznie materiałów kompozytowych o dużej powierzchni granicy międzyfazowej,
- lekkie kruszywa ceramiczne mają znacznie większą powierzchnię niż tradycyjne kruszywa w betonie. Otwarte pory na powierzchni granул poprawiają jakość połączenia międzyfazowego,



Rys. 4. Wytrzymałość na ściskanie (a) i zginanie (b) badanych materiałów

Fig. 4. Compressive strength (a) and flexural strength (b) of investigated materials



Rys. 3. Powierzchnia kruszyw ceramicznych lekkich A- surowiec (nieinfiltrowany), B- materiał infiltrowany zanurzeniowo (bez ciśnienia), C - materiał infiltrowany próżniowo

Fig. 3. Surface of lightweight ceramic aggregates A- raw material (non-infiltrated), B- immersion infiltrated material (no pressure), C - vacuum infiltrated material

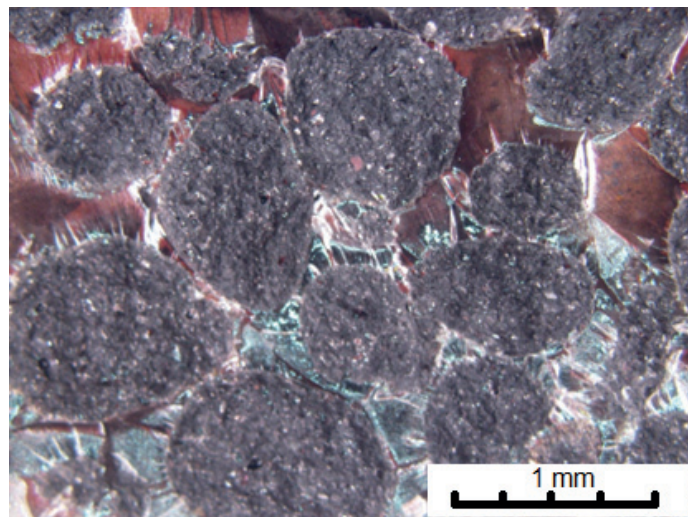
during 10 min. Normal atmospheric pressure allows the pores to be partially filled, but deeper areas remain unfilled. The difference in pressure between the atmospheric pressure and the pressure inside the hollow areas allows the resin to be forced into deep areas.

The diagram of granule penetration by liquid resin is shown in Fig. 3. Atmospheric pressure allows the resin to penetrate into the pores, contributing to the percentage reduction of open porosity and reducing water absorption [Fig. 3b]. The use of low vacuum allows the penetration of deep pores and leaves more resin in these areas [Fig. 3 c], which is reflected in the higher density of the material. The penetration of resin into the porous ceramic structure has a beneficial effect on the mechanical strength, as the ceramic body gains additional polymer reinforcement. In this way, a ceramic foam-reinforced polymer composite is formed locally.

- korzystnie spękanie polimerobetonu przebiega w poprzek granul, co oznacza przeniesienie obciążeń zewnętrznych z osnowy na zbrojenie,
- pożądane jest połączenie wysokiej wytrzymałości mechanicznej ze stosunkowo małą gęstością. Dodatkowo granulát ceramiczny poprawia izolację termiczną i akustyczną materiału, a żywica zastosowana jako osnowa zapewnia szczelność, odporność na korozję i czynniki chemiczne oraz przedłuża żywotność materiału.

Literatura / References

1. V. Choudhry, S. R. Hadley, Utilization of Coal Gasification Slag. ACS Symp. Ser. **515**, 253–263 (1992). <https://doi.org/10.1021/bk-1992-0515.ch020>
2. V. Sata, P. Chindaprasirt, Use of construction and demolition waste (CDW) for alkali-activated or geopolymer concrete. Adv. Constr. Demol. Waste Recycl. 385–403 (2020). <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-819055-5.00019-X>
3. H.J. Chen, M.D. Yang, C.W. Tang, S.Y. Wang, Producing synthetic lightweight aggregates from reservoir sediments. Constr. Build. Mater. **28**(1), 387–394 (2012). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.08.051>
4. M. Liu, C. Wang, Y. Bai, G. Xu, Effects of sintering temperature on the characteristics of lightweight aggregate made from sewage sludge and river sediment. J. Alloys Compd. **748**, 522–527 (2018). <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2018.03.216>
5. J. M. Moreno-Maroto, M. Uceda-Rodríguez, C. J. Cobo-Ceacero, T. Cotes-Palomino, C. Martínez-García, J. Alonso-Azcárate, Studying the feasibility of a selection of Southern European ceramic clays for the production of lightweight aggregates. Constr. Build. Mater. **237**, 117583 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117583>
6. A. A. Boateng, E. R. Thoen, F. L. Orthlieb, Modelling the pyroprocess kinetics of shale expansion in a rotary kiln. Chem. Eng. Res. Des. **75**(3), 278–283 (1997). <https://doi.org/10.1205/026387697523723>
7. W. Szczygielski, I. Walentek, Surowce ceramiki budowlanej (building ceramics raw materials), surowce do produkcji kruszyw ceramicznych i cementu (mineral raw materials for production of clay aggregates and cement clinker). In: „Bilans perspektywicznych zasobów kopalin Polski wg stanu na 31.12.2018 r.” (K. Szamalek, M. Szufficki, W. Mizerski), 239–257 (2020). PIG-PIB, Warszawa.
8. H. J. Chen., S. Y. Wang, C. W. Tang, Reuse of incineration fly ashes and reaction ashes for manufacturing lightweight aggregate. Constr. Build. Mater. **24**(1), 46–55 (2010). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.08.008>
9. O. Kayali, Fly ash lightweight aggregates in high performance concrete. Constr. Build. Mater. **22**(12), 2393–2399 (2008). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.09.001>
10. J. M. J. M. Bijen, Manufacturing processes of artificial lightweight aggregates from fly ash. Int. J. Cem. Comp. Lightweight Concr. **8**(3), 191–199 (1986). [https://doi.org/10.1016/0262-5075\(86\)90040-0](https://doi.org/10.1016/0262-5075(86)90040-0)
11. J. Chiou, K. S. Wang, C. H. Chen, Y. T. Lin, Lightweight aggregate made from sewage sludge and incinerated ash. Waste Manag. **26**(12), 1453–1461 (2006). <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2005.11.024>
12. M. Franus, D. Barnat-Hunek, M. Wdowin, Utilization of sewage sludge in the manufacture of lightweight aggregate. Environ. Monit. Assess. **188**(1), 1–13 (2016). <https://doi.org/10.1007/s10661-015-5010-8>



Rys. 5. Lekki polimerobeton z LWA, przełom materiału. Mikroskop stereo-skopowy, powiększenie 5x.

Fig. 5. Lightweight polymer concrete with LWA, material breakthrough. Stereo microscope, 5x magnification.

The compressive strength [Fig. 4a] and the flexural strength [Fig. 4b] indicate significantly better properties of the obtained lightweight polymer concrete than traditional cement concrete. Concrete samples were made for comparison purposes and tested with the same parameters as polymer concrete. The compressive strength of the sample with immersion-infiltrated granules is approximately 40 MPa, and the vacuum infiltration process significantly increases the compressive strength to approximately 90 MPa. Traditional concrete tested under the same conditions reaches a compressive strength of about 15 MPa. The bending strength of polymer concrete with immersion-infiltrated granules is about 20 MPa, with vacuum-infiltrated granules about 30 MPa, and about 5 MPa for traditional concrete. Polymer concrete cracked during bending, cutting the granule crosswise [Fig. 5], which is a favourable phenomenon. The material does not crack at the interface, which means that the bond between the epoxy resin [matrix] and the ceramic surface [reinforcement] is very good. External stress transferred from the matrix to the reinforcement [ceramic scaffolding]. Vacuum infiltration provides a larger interface than immersion infiltration, which allows for better strength. A similar strengthening mechanism is used in many composite materials, where the use of ceramic foam increases mechanical properties (31–35). The polymer concrete has a density of about 1750 kg/m³, allowing it to be included in the group of lightweight concretes.

4. Conclusions

The conducted research allows to conclude that:

- it is possible to produce lightweight ceramic aggregates based on waste materials, including contaminated waste,
- polymer concrete filled with 60% by volume with a lightweight ceramic aggregate, has a density of about 1750 kg/m³ and belongs to the group of lightweight concretes,

13. M. Liu, C. Wang, Y. Bai, G. Xu, Effects of sintering temperature on the characteristics of lightweight aggregate made from sewage sludge and river sediment. *J. Alloys Compd.* **748**, 522-527 (2018). <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2018.03.216>
 14. B. L. A. Tuan, C. L. Hwang, K. L. Lin, Y. Y. Chen, M. P. Young, Development of lightweight aggregate from sewage sludge and waste glass powder for concrete. *Constr. Build. Mater.* **47**, 334-339 (2013). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.05.039>
 15. I. Kourti, C. R. Cheeseman, Properties and microstructure of lightweight aggregate produced from lignite coal fly ash and recycled glass. *Resour. Conserv. Recyc.* **54**(11), 769-775 (2010). <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2009.12.006>
 16. F. Andreola, A. Borghi, S. Pedrazzi, G. Allesina, P. Tartarini, I. Lancelotti, L. Barbieri, Spent coffee grounds in the production of lightweight clay ceramic aggregates in view of urban and agricultural sustainable development. *Materials*, **12**(21), 3581 (2019). <https://doi.org/10.3390/ma12213581>
 17. G. P. Lyra, V. dos Santos, B. C. De Santis, R. R. Rivaben, C. Fischer, E. M. D. J. A. Pallone, J. A. Rossignolo, Reuse of sugarcane bagasse ash to produce a lightweight aggregate using microwave oven sintering. *Constr. Build. Mater.* **222**, 222-228 (2019). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.06.150>
 18. T. Y. Lo, W. C. Tang, H.Z. Cui, The effects of aggregate properties on lightweight concrete. *Build. Environ.* **42**(8), 3025-3029 (2007). <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2005.06.031>
 19. A. Terzić, L. Pezo, V. Mitić, Z. Radojević, Artificial fly ash based aggregates properties influence on lightweight concrete performances. *Ceram. Int.* **41**(2), 2714-2726 (2015). <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2014.10.086>
 20. S. T. Tassew, A. S. Lubell, Mechanical properties of lightweight ceramic concrete. *Mater. Struct.* **45**(4), 561-574 (2012). <https://doi.org/10.1617/s11527-011-9782-1>
 21. A. M. Rashad, Lightweight expanded clay aggregate as a building material—An overview. *Constr. Build. Mater.* **170**, 757–775 (2018). [doi:10.1016/j.conbuildmat.2018.03.009](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.03.009)
 22. D. Józwiak-Niedźwiedzka, Scaling resistance of high performance concretes containing a small portion of pre-wetted lightweight fine aggregate. *Cem. Concr. Comp.* **27**(6), 709-715 (2005). <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2004.11.001>
 23. H. K. Kim, J. H. Jeon, H. K. Lee, Workability, and mechanical, acoustic and thermal properties of lightweight aggregate concrete with a high volume of entrained air. *Constr. Build. Mater.* **29**, 193-200 (2012). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.08.067>
 24. M. C. Nepomuceno, L. A. Pereira-de-Oliveira, S. F. Pereira, Mix design of structural lightweight self-compacting concrete incorporating coarse lightweight expanded clay aggregates. *Constr. Build. Mater.* **166**, 373-385 (2018). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.01.161>
 25. N. Salem, M. Ltifi, H. Hassis, Characterization of lightweight aggregates manufactured from Tunisian clay. *J. Sci. Res.* **4**(7), 43-51 (2014).
 26. M. Malešev, V. Radonjanin, I. Lukić, V. Bulatović, The effect of aggregate, type and quantity of cement on modulus of elasticity of lightweight aggregate concrete. *Arabian J. Sci. Eng.* **39**(2), 705-711 (2014). <https://doi.org/10.1007/s13369-013-0702-2>
 27. J. Alexandre Bogas, M. G. Gomes, S. Real, Capillary absorption of structural lightweight aggregate concrete. *Mater. Struct.* **48**(9), 2869-2883 (2015). <https://doi.org/10.1617/s11527-014-0364-x>
 28. L. Bodnárová, R. Hela, M. Hubertová, I. Nováková, Behaviour of lightweight expanded clay aggregate concrete exposed to high temperatures. *Int. J. Civil Environ. Eng.* **8**(12), 1210-1213 (2014).
- vacuum infiltration is more efficient than immersion infiltration and allows for a significant reduction in open porosity, which has a positive effect on reducing water absorption and, consequently, increasing resistance to chemical agents and ensuring resistance to temperature changes,
 - infiltration of porous granules by epoxy resin is an effective method of producing high strength composite materials with a large interface area,
 - lightweight ceramic aggregates have a significantly larger surface area than traditional aggregates in concrete. Open porosities on the granule surface improve the interfacial interface,
 - preferably, cracking of polymer concrete goes across the granules, which means that external loads are transferred from the matrix to the reinforcement,
 - a combination of high mechanical strength with a relatively low density is desirable. Additionally, ceramic granules improve the thermal and acoustic insulation of the material, and the resin used as a matrix ensures tightness, resistance to corrosion and chemical agents, and extends the life of the material.

29. L. Czarnecki, *Betony polimerowe. Cement Wapno Beton*, **2**, 63-82 (2010).
30. M. Nodehi, Epoxy, polyester and vinyl ester based polymer concrete: a review. *Innovative Infrastructure Solutions*, **7**(1), 1-24 (2022). <https://doi.org/10.1007/s41062-021-00661-3>
31. J. Zeschky, J. Lo, T. Höfner, P. Greil, Mg alloy infiltrated Si–O–C ceramic foams. *Materials Science and Engineering: A*, **403**(1-2), 215-221 (2005). <https://doi.org/10.1016/j.msea.2005.04.052>
32. S. Vaucher, J. Kuebler, O. Beffort, L. Biassetto, F. Zordan, P. Colombo, Ceramic foam-reinforced Al-based micro-composites. *Comp. Sci. Techn.* **68**(15-16), 3202-3207 (2008). <https://doi.org/10.1016/j.compsci-tech.2008.08.004>
33. P. Colombo, F. Zordan, E. Medvedovski, Ceramic–polymer composites for ballistic protection. *Adv. Appl. Ceram.* **105**(2), 78-83 (2006). <https://doi.org/10.1179/174367606X84440>
34. A. Olszówka-Myalska, M. Godzierz, J. Myalski, Impact of carbon foam cell sizes on the microstructure and properties of pressure infiltrated magnesium matrix composites. *Materials*, **13**(24), 5619 (2020). <https://doi.org/10.3390/ma13245619>
35. J.G. de Salazar, M.I. Barrena, G. Morales, L. Matesanz, N. Merino, Compression strength and wear resistance of ceramic foams–polymer composites. *Mater. Lett.* **60**(13-14), 1687-1692 (2006). <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2005.11.092>
36. M. Godzierz, B. Adamczyk, T. Pawlik, M. Sopicka-Lizer, Mechanical and physical properties of light-weight ceramic aggregates prepared from waste materials. *Waste Biomass Valor.* **11**(5), 2309-2319 (2020). <https://doi.org/10.1007/s12649-018-0464-x>