

Właściwości betonu z dodatkiem kruszywa z żużla pomiedziowego

Properties of concrete with the addition of copper slag aggregate

Jacek Korentz¹, Robert Jurczak^{2,3}, Filip Szmatuła³

¹ University of Zielona Góra

² West Pomeranian University of Technology in Szczecin

³ General Directorate for National Roads and Motorways (GDDKiA) Branch in Szczecin

*corresponding author: J. Korentz, e-mail: j.korentz@ib.uz.zgora.pl

Streszczenie

W ostatnim okresie zapotrzebowanie na różnego rodzaju kruszywa w Polsce jest bardzo znaczne. Zasoby kruszyw naturalnych kurczą się, a ich eksploatacja ma bardzo duży wpływ na środowisko. Dlatego kruszywa z recyklingu i kruszywa sztuczne, w tym kruszywa z żużla pomiedziowego, są coraz częściej stosowane w budownictwie drogowym oraz kolejowym, a także budownictwie ogólnym. W artykule zaprezentowano wyniki badań doświadczalnych dotyczących możliwości zastosowania kruszywa z żużla pomiedziowego do produkcji betonów konstrukcyjnych, które poza odpowiednią wytrzymałością na ściskanie były odporne na warunki atmosferyczne, a tym samym mogły mieć zastosowanie w obiektach mostowych, drogowych lub innych obiektach narażonych na tak szczególne warunki. W przeprowadzonych badaniach dokonano oceny cech fizycznych i mechanicznych materiałów wchodzących w skład betonu, ale główny nacisk położono na badania wpływu ilości kruszyw z żużla pomiedziowego na podstawowe właściwości betonu, a mianowicie: wytrzymałość na ściskanie, nasiąkliwość i mrozoodporność. Wyniki badań wykazały, że kruszywo z żużla pomiedziowego z powodzeniem może zastąpić kruszywo naturalne w betonach cementowych. Kruszywo to wykazywało lepsze właściwości niż użyte w betonach wzorcowych kruszywo granitowe. Wszystkie betony badane po 28 dniach spełniły warunki dotyczące wytrzymałości. Dla betonów o zawartości kruszyw z żużla pomiedziowego 25% i 50% nastąpił kilkuprocentowy przyrost wytrzymałości na ściskanie. Natomiast dla betonów z 75% i 100% udziałem tego kruszywa odnotowano zmniejszenie wytrzymałości na ściskanie o 14%. Nasiąkliwość betonu wzorcowego wypadła gorzej niż wszystkich betonów zawierających kruszywo z żużla pomiedziowego. Zarówno beton wzorcowy jak i wszystkie betony z kruszywem z żużla pomiedziowego spełniają wymagania dla stopnia mrozoodporności F150. Wytrzymałość na ściskanie betonów z kruszywem z żużla pomiedziowego po 150 cyklach zamrażania i rozmrażania zmniejsza się maksymalnie o 4%.

Summary

Recently, the demand for various types of aggregates in Poland has been very significant. The resources of natural aggregates are shrinking and their exploitation has a large environmental impact. Recycled and artificial aggregates, including copper slag aggregates, are therefore increasingly used in road and railway construction as well as in general construction works. The paper presents the results of experimental research concerning the possibility of using copper slag aggregates for the production of structural concretes which, apart from their adequate compressive strength, were resistant to atmospheric conditions and thus could be used in bridges, roads, or other objects exposed to such special conditions. In the conducted research, the physical and mechanical characteristics of the materials included in the concrete were assessed, but the main emphasis was put on the research on the influence of the quantity of copper slag aggregates on the basic properties of concrete such as: compressive strength, water absorption, and freeze-thaw durability. The results of the research showed that copper aggregate can successfully replace natural aggregate in cement concretes. The copper slag aggregate showed better properties than the granite aggregate used in the reference concrete. All the concretes tested after 28 days met the concrete strength requirements. For the concretes with a copper slag aggregate content of 25% and 50% there was a few percent increase in compressive strength. On the other hand, for the concretes with 75% and 100% of the copper slag aggregate, compression strength drops of up to 14% were recorded. The water absorption of the reference concrete was worse than that of all the concretes containing copper slag aggregates. Both the reference concrete and all the concretes with copper slag aggregate meet the requirements for freeze-thaw durability grade F150. Concretes with copper slag aggregate subjected to 150 freezing and thawing cycles exhibit a compression strength drop of up to 4%.

Słowa kluczowe: Beton, kruszywo z żużła pomiedziowego, wytrzymałość, nasiąkliwość, mrozoodporność

Keywords: Concrete, copper slag aggregate, strength, absorptivity, freeze-thaw durability

1. Wprowadzenie

Zgodnie z normą PN-EN 12620+A1:2010 *Kruszywa do betonu* wyróżnia się trzy podstawowe rodzaje kruszyw: kruszywa naturalne: łamane i żwirowe, kruszywa sztuczne, kruszywa z recyklingu. Kruszywa alternatywne stanowią bardzo ważne uzupełnienie rynku kruszyw naturalnych (1). Do kruszyw sztucznych zaliczane są także kruszywa produkowane z wtórnych surowców odpadowych powstających między innymi w hutnictwie metali kolorowych. Głównym, a także jedynym producentem kruszyw z żużła pomiedziowego w Polsce jest spółka skarbu państwa KGHM Polska Miedź SA – czołowy producent miedzi na świecie. Kruszywa z żużła pomiedziowego produkowane są z żużli z pieców szybowych i pieców elektrycznych. Technologia produkcji kruszyw z żużła z pieca elektrycznego polega na wylewaniu płynnego żużła do specjalnych dołów żużlowych w warstwach o określonej grubości, w określonych przedziałach czasowych, a następnie kruszenie na odpowiednie frakcje (2). Materiał ten w 96,5% stanowią składniki skałotwórcze. W efekcie żużel pomiedziowy składem chemicznym przypomina bazalt i gabro. W polskim przemyśle miedziowym rocznie powstaje 1,3 mln ton produktów ubocznych, z czego około 95% to szybowy oraz granulowany żużel pomiedziowy (3). Aktualnie produkuje się około 0,7 mln ton kruszyw z żużła pomiedziowego rocznie, co stanowi około 10% udziału w rynku kruszyw sztucznych w Polsce. Są to kruszywa drobne [frakcja 0-5 mm], grysy o różnych frakcjach [5-22 mm], mieszanki do stabilizacji i kruszywa o uziarnieniu ciągłym (4). Kruszywa te są głównie wykorzystywane w budownictwie drogowym na warstwy podbudowy, a także warstwy stabilizacyjne.

Prowadzone są liczne badania pod kątem zastosowania kruszyw z żużła pomiedziowego w betonach cementowych. Badania wpływu ilości kruszywa z żużła pomiedziowego na właściwości zaprawy cementowej i betonu wykazały, że dodatek drobnych frakcji kruszywa z żużła powoduje zwiększenie wytrzymałości na ściskanie zapraw cementowych, a w przypadku betonu wytrzymałość na ściskanie jest na porównywalnym poziomie (5). Badania dotyczące zastosowania kruszywa z żużła pomiedziowego, jako zamiennika kruszywa naturalnego w betonach o wytrzymałości większej niż 150 MPa wykazały, że zastosowanie kruszywa z żużła pomiedziowego powoduje zmniejszenie 28-dniowej wytrzymałości na ściskanie w granicach 15% - 25%, podczas gdy wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu jest podobna (6). Według badań wytrzymałość na ściskanie betonu z kruszywem z żużła pomiedziowego zwiększa się ze zwiększeniem dodatku tego kruszywa i jest większa maksymalnie o około 18% niż wytrzymałość betonu wzorcowego (7). W pracy badano wpływ dodatku drobnego kruszywa z żużła pomiedziowego na wytrzymałość betonu na ściskanie, a także na moduł Younga oraz odporność na oddziaływanie kwasu siarkowego (8). Moduł Younga w zależności od ilości

1. Introduction

According to the standard PN-EN 12620+A1:2010 *Concrete aggregates*, three basic types of aggregates are distinguished: natural aggregates [crushed rock and gravel], artificial aggregates, and recycled aggregates. Alternative aggregates are a very important complement to the natural aggregates market (1). Aggregates produced from secondary waste raw materials, including those produced in the non-ferrous metallurgy, are also included. The main, and also the only producer of copper slag aggregates in Poland is the state-owned company KGHM Polska Miedź – the world's leading copper producer. Copper slag aggregates are produced from slag from shaft furnaces and electric furnaces. The technology for the production of slag aggregates from an electric furnace consists of pouring liquid slag into special slag pits in layers of a certain thickness, at specified intervals, and then crushing into suitable fractions (2). This material is composed of 96.5% of rock-forming components. As a result, the chemical composition of the copper slag resembles basalt and gabbro. The Polish copper industry produces 1.3 million tones of by-products annually, of which approximately 95% is a shaft and granulated copper slag (3). Currently, approximately 0.7 million tones of copper slag aggregates are produced annually, which accounts for approximately 10% of the market share of artificial aggregates in Poland. These are fine aggregates [0-5 mm fraction], chippings with different fractions [5-22 mm], mixtures for stabilisation and continuous-grained aggregates (4). These aggregates are mainly used in road construction for the base and sub-base layers as well as stabilisation layers.

Numerous studies are being carried out on the use of copper wastes aggregates in cement concretes. The research on the effect of the quantity of copper slag aggregate on the properties of cement mortar and concrete have shown that the addition of fine fractions of copper slag aggregate increases the compressive strength of cement mortars, and in the case of concrete, the compressive strength is at a comparable level (5). Studies on the use of copper slag aggregate as a substitute for natural aggregate in concretes with a strength greater than 150 MPa have shown that the use of copper slag aggregate results in a reduction of 28-day compressive strength between 15% and 25%, while the flexural strength is at a comparable level (6). According to the research, the compressive strength of concrete with copper slag aggregate increases with an increase in the quantity of this aggregate and is at most 18% higher than that of the control concrete (7). In the study, the effect of the quantity of fine copper slag aggregate on the compressive strength of concrete, as well as on Young's modulus and resistance to sulphuric acid was investigated (8). Young's modulus can be up to 42% higher than Young's modulus of concrete with natural aggregates, depending on the quantity of the copper slag aggregate.

kruszywa z żużla pomiedziowego może być do 42% większy niż moduł Younga betonu z kruszywem naturalnym. Z kolei badania wykazały, że zastąpienie kruszywa naturalnego kruszywem z żużla pomiedziowego powoduje niewielki wzrost wytrzymałości betonu na ściskanie po 28 dniach, maksymalnie o 3,2% (9). Jednak korzyści z zastosowania kruszywa z żużla pomiedziowego są większe w przypadku wytrzymałości betonu na rozciąganie i zginanie. Wzrost wytrzymałości jest bliski 10%. Prowadzone były także badania, nad zastosowaniem zmielonego kruszywa z żużla pomiedziowego, jako dodatku do betonu w celu częściowego zastąpienia cementu (10, 11). Wyniki tych badań pokazują, że kilkuprocentowy dodatek zmielonego żużla pomiedziowego powoduje widoczny wzrost wytrzymałości na ściskanie zaprawy cementowej. Według opracowania frakcje kruszywa z żużla pomiedziowego i jego ilość w mieszance betonowej mogą mieć zarówno pozytywny jak i negatywny wpływ na właściwości mechaniczne, a także fizyczne betonu stwardniałego (12). Kruszywo z żużla pomiedziowego w ilości mniejszej niż 40% całkowitej masy kruszywa poprawia wytrzymałość betonu na ściskanie, jego urabialność, skurcz, odporność na działanie chlorków. Z kolei ilość tego kruszywa większa niż 40-50% ma negatywny wpływ na wytrzymałość betonu na ściskanie i jego odporność na oddziaływanie kwasów. Mimo już licznych badań doświadczalnych konieczne są dalsze badania dotyczące właściwego doboru frakcji kruszywa z żużla pomiedziowego w celu uzyskania odpowiedniej wytrzymałości na ściskanie oraz wystarczającej odporności chemicznej, ścieralności, mrozoodporności czy odporności na karbonatyzację (12). Badania te pozwolą na określenie przydatności kruszyw z żużla pomiedziowego w produkcji betonu towarowego o zróżnicowanym przeznaczeniu.

W pracy przedstawiono wyniki badań doświadczalnych wpływu zastąpienia kruszyw naturalnych kruszywem z żużla pomiedziowego na wytrzymałość betonu na ściskanie, jego nasiąkliwość i mrozoodporność. Celem tych badań było określenie ilości kruszywa z żużla pomiedziowego, którą można zastosować, jako zamiennik kruszywa naturalnego tak, aby właściwości mechaniczne betonu i jego odporność na oddziaływania środowiskowe spełniały odpowiednie wymagania normowe.

2. Wyniki badań materiałów i mieszanki betonowej

2.1. Materiały

W badaniach zastosowano cement portlandzki o wysokiej wytrzymałości wczesnej CEM I 42,5R firmy LafargeHolcim, zakład Kujawy w Bielawach. Przeprowadzone badania cementu dały następujące wyniki: początek czasu wiązania 174 min, koniec czasu wiązania 315 min, wytrzymałość na zginanie 7,8 MPa, wytrzymałość na ściskanie po 2 dniach 28,5 MPa, a po 28 dniach 50,2 MPa, wodożądność 30%.

Do wykonania mieszanki betonowej zastosowano piasek naturalny z Kopalni Surowców Naturalnych Mielenko Drawsko Pomorskie,

In turn, the research has shown that replacing natural aggregate with copper slag aggregate results in a slight increase in concrete compressive strength after 28 days; maximum 3.2% (9). However, the benefits of copper slag aggregate are greater for the tensile and flexural strength of concrete. The strength increase is close to 10%. Research has also been carried out on the use of ground copper slag aggregate as a concrete admixture to partially replace cement (10, 11). The results of these studies show that a few percent addition of ground copper slag results in a visible increase in the compressive strength of the cement mortar. According to the studies, the fractions of copper slag aggregate, its amount in the concrete mix has a positive and negative impact on the mechanical and physical properties of hardened concrete (12). Aggregate in quantities lower than 40% of the total aggregate mass improves the compressive strength of concrete, its workability, shrinkage, and chloride resistance. On the other hand, an amount of copper slag aggregate greater than 40-50% has a negative impact on the compressive strength and acid resistance of concrete. In spite of the already numerous experimental studies, further research is needed on the proper selection of the fraction of copper slag aggregate, in order to obtain adequate compressive strength and sufficient chemical resistance, abrasion resistance, freeze-thaw durability, or carbonation resistance (12). Such research will enable us to determine increasingly broadly the impact of the use of copper slag aggregates in the production of ready-mixed concrete.

The paper presents the results of experimental research of the influence of substitution of natural aggregate with copper slag aggregate on the compressive strength of concrete, its water absorption and freeze-thaw durability. The purpose of these tests was to determine the amount of the copper slag aggregate that can be used as a substitute for natural aggregate, so that the strength parameters of concrete and its resistance to environmental impacts meet the relevant standard requirements.

2. Results of materials and concrete mix tests

2.1. Materials

In the tests Portland cement with high early strength CEM I 42.5R from LafargeHolcim, Kujawy plant in Bielawy was used. The cement tests carried out gave the following results: setting time initial 174 min, setting time final 315 min, flexural strength 7.8 MPa, compressive strength after 2 days 28.5 MPa and after 28 days 50.2 MPa, water demand 30%.

Natural sand from the Mielenko Drawsko Pomorskie Natural Resources Mine, granite aggregate from the Rogoźnica II Granite Mine and copper slag aggregate from KGHM were used for the concrete mix. Table 1 shows the results of the sieve analysis of the aggregates used.

The following tests were carried out for aggregates: determination of crushing strength, determination of water absorption, determination of freezing and thawing resistance in water and in the presence of salt, determination of the shape of aggregate grains,

Tablica 1 / Table 1

WYNIKI ANALIZY SITOWEJ ZASTOSOWANYCH KRUSZYW

RESULTS OF SIEVE ANALYSIS OF THE AGGREGATES USED

Średnica / Diameter, mm	Piasek / Sand, 0÷2 mm, %	Kruszywo granitowe Granite aggregate, 4÷8 mm, %	Kruszywo granitowe Granite aggregate 8÷16 mm, %	Kruszywo pomiedziowe Copper slag aggregate 0÷31.5 mm, %
31.50				1.6
16.00			9.1	27.1
8.00		4.7	81.6	23.1
4.00		43.4	7.8	11.1
2.00	1.1	47.0	1.5	7.5
1.00	8.6	3.6		12.4
0.50	32.1	1.3		9.9
0.250	42.0			4.3
0.125	14.6			2.0
up to 0	1.6			1.1

Tablica 2 / Table 2

WŁAŚCIWOŚCI KRUSZYW UŻYTYCH W BADANIACH

PROPERTIES OF AGGREGATES USED IN EXPERIMENTS

Oznaczenie / Denotation	Kruszywo granitowe Granite aggregate		Kruszywo z żużla pomiedziowego Copper slag aggregate	
	4/8	8/16	4/8	8/16
Frakcja / Fraction, mm	4/8	8/16	4/8	8/16
Wytrzymałość na miażdżenie / Crushing resistance, %	10.6	9.7	8.0	8.7
Nasiąkliwość / Water absorption, %	-	0.61	-	0.35
Mrozoodporność w wodzie / Freezing and thawing in water, %	0.10	0.10	0.17	0.14
Mrozoodporność w 1% roztworze soli / Freezing and thawing in the presence of salt, %	0.07	0.10	0.07	0.08
Zawartość ziaren nieforemnych / Flakiness index, %	13.5	10.5	19.4	12.1
Zawartość zanieczyszczeń obcych / Foreign impurities content, %	0.00	0.04	0.05	0.07
Rozpad żelazowy / Iron decay, %	0.04	0.04	0.02	0.03
Gęstości nasypowa w stanie luźnym / Loose bulk density, kg/m ³	1331	1404	1532	1581
Gęstości właściwa / Density, kg/m ³	-	2628	-	3085
Zawartości ziaren słabych / Weak grains content, %	-	13.9	-	6.4

kruszywo granitowe z Kopalni Granitu Rogoźnica II i kruszywo pomiedziowe z KGHM. W tablicy 1 zamieszczono wyniki analizy sitowej zastosowanych kruszyw.

Dla kruszyw przeprowadzono następujące badania: oznaczenie wytrzymałości na miażdżenie, oznaczenie nasiąkliwości, oznaczenie mrozoodporności w wodzie i w obecności soli, oznaczenie kształtu ziaren kruszywa, oznaczenie zanieczyszczeń obcych w kruszywie, oznaczenie rozpadu żelazowego kruszywa, oznaczenie gęstości nasypowej, oznaczenie gęstości właściwej oraz zawartości słabych ziaren kruszywa. W tablicy 2 zamieszczono wyniki przeprowadzonych badań właściwości kruszywa naturalnego i kruszywa z żużla pomiedziowego.

Wyniki przeprowadzonych badań, zamieszczone w tablicy 2, pokazują, że kruszywo z żużla pomiedziowego ma wyraźnie lepszą wytrzymałość na miażdżenie, mniejszą nasiąkliwość, lepszą

determinację zanieczyszczeń obcych w agregacie, rozpad żelazowy, determinację gęstości nasypowej, determinację gęstości właściwej i zawartości słabych ziaren agregatu. Tablica 2 przedstawia wyniki badań nad właściwościami naturalnego agregatu i agregatu żużla pomiedziowego.

Wyniki badań, przedstawione w Tablicy 2, pokazują, że agregat żużla pomiedziowego ma znacznie wyższą wytrzymałość na miażdżenie, niższe nasiąkliwość, lepszą mrozoodporność w 1% roztworze soli i mniejszą zawartość słabych ziaren niż naturalny agregat granitowy. Inne właściwości agregatu granitowego i agregatu żużla pomiedziowego są podobne.

Fig. 1 przedstawia krzywe granic wielkości ziaren i krzywą wielkości ziaren mieszanki podstawowej, użytej w badaniach.

mrozoodporność w 1% roztworze soli i mniejszą zawartość ziaren słabych, niż naturalne kruszywo granitowe. Pozostałe cechy kruszywa granitowego i kruszywa z żużla pomiedziowego są podobne.

Na rys. 1 zamieszczono krzywe graniczne uziarnienia i projektowaną krzywą uziarnienia mieszanki podstawowej zastosowanej w badaniach.

Projektowaną krzywą uziarnienia przyjęto za wzorcową. Na podstawie krzywej wzorcowej dobrano uziarnienie dla wszystkich wykonywanych mieszanek betonowych, ustalając odpowiednie stosunki procentowe poszczególnych frakcji kruszywa.

2.2. Mieszanka betonowa

W badaniach zaprojektowano beton klasy C30/37. Określenie składu mieszanki betonowej zostało poprzedzone oznaczeniem wodożądności cementu oraz analizą sitową poszczególnych kruszyw, przewidywanych do zastosowania w mieszance betonowej. Zaprojektowano pięć mieszanek betonowych: jedną wzorcową, bez kruszywa z żużla pomiedziowego oznaczoną jako CS0 i cztery z kruszywem z żużla pomiedziowego w ilości 25%, 50%, 75% i 100% masowo w stosunku do kruszywa granitowego, oznaczone odpowiednio symbolami CS25, CS50, CS75 i CS100. Uziarnienie kruszywa dla poszczególnych mieszanek dobrano tak, aby poszczególne krzywe uziarnienia przypadły pomiędzy krzywymi granicznymi wg. normy PN-88/B-06250 *Beton zwykły*. Wszystkie mieszanki miały taki sam wskaźnik wodno-cementowy $w/c = 0,47$. Dla wszystkich mieszanek zastosowano stałą ilość domieszki napowietrzającej i poprawiającej urabialność. Dla wszystkich mieszanek oznaczono konsystencję metodą opadu stożka i zawartość powietrza w mieszance betonowej metodą ciśnieniową. Wyniki tych badań zamieszczono w tabelicy 3.

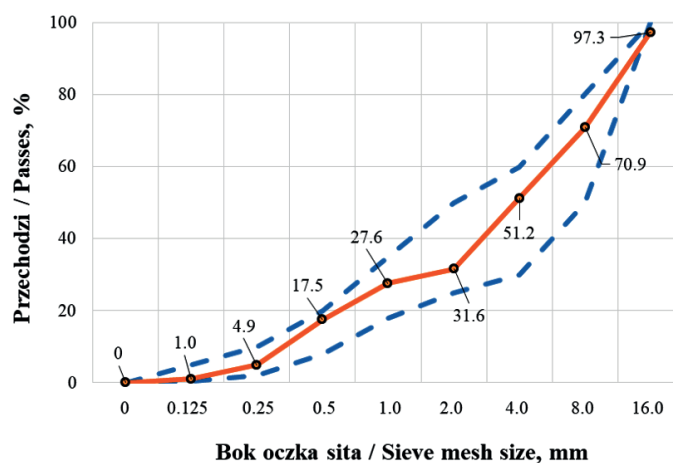
Wyniki zamieszczone w tabelicy 3 pokazują, że zwiększenie dodatku kruszywa z żużla pomiedziowego zwiększa płynność mieszanki betonowej, której konsystencja zmienia się z gęstoplastycznej S2 dla mieszanki CS25 i CS50 na plastyczną S3 dla mieszanki CS75 i CS100. Jest to efekt wodożądności kruszywa, która maleje wraz ze wzrostem ilości kruszywa z żużla pomiedziowego. Zwiększona ilość kruszywa z żużla pomiedziowego powoduje nieznaczny wzrost zawartości powietrza w mieszance betonowej. Zwiększanie ilości kruszywa z żużla pomiedziowego powoduje także wzrost gęstości mieszanki betonowej, co jest wynikiem różnic w gęstości właściwej kruszywa granitowego i kruszywa z żużla pomiedziowego.

Tablica 3 / Table 3

WŁAŚCIWOŚCI MIESZANKI BETONOWEJ

CONCRETE MIX PROPERTIES

Mieszanka / Mix	CS0	CS25	CS50	CS75	CS100
Opad stożka / Slump, mm	50	65	80	110	120
Klasa konsystencji / Consistency class, -	S2	S2	S2	S3	S3
Gęstość / Density, kg/m ³	2310	2380	2410	2440	2460
Zawartość powietrza / Air content, %	4.2	4.3	4.5	4.5	4.4



Rys. 1. Graniczne krzywe uziarnienia i projektowana krzywa uziarnienia mieszanki podstawowej zastosowanej w badaniach

Fig. 1. Upper and lower recommended limit curves of grain size distribution and grain size distribution curve of the basic aggregate mix used in the research

The designed grain size curve was taken as a benchmark. On the basis of the master curve, the grain size was selected for all the concrete mixes produced in appropriate percentage ratios of individual aggregate fractions.

2.2. Concrete mix

In the studies, class C30/37 concrete was designed. The determination of the concrete mix composition was preceded by the determination of the cement water demand and sieve analysis of individual aggregates, to be used in the concrete mix. Five concrete mixes were designed: one reference mix without the copper slag aggregate: CS0, and four mixes with copper slag aggregate in the amount of 25%, 50%, 75% and 100% by mass in relation to granite aggregate, marked with symbols CS25, CS50, CS75 and CS100 respectively. The aggregate grain size for individual mixes was selected so that individual grain size curves are between limit curves according to PN-88/B-06250 *Conventional concrete*. All the mixes had the same water-cement ratio $w/c = 0.47$. A constant content of air-entraining and workability improving admixture was used for all the mixes. The consistency was determined for all the mixes using the slump method and the air content in the concrete mixture using the pressure gauge method; the results of these tests are presented in Table 3.

3. Wyniki badań betonu

Badania betonu miały na celu określenie wpływu dodatku kruszywa z żużla pomiedziowego na wytrzymałość betonu na ściskanie oraz jego mrozoodporność i nasiąkliwość. Wyniki tych badań stanowią podstawę oceny możliwości zastosowania betonu w warunkach narażenia na oddziaływanie czynników atmosferycznych.

3.1. Wytrzymałość na ściskanie

Badania wytrzymałości na ściskanie przeprowadzono na próbkach sześciennych 150 mm x 150 mm x 150 mm. Wytrzymałość betonu badano po 7, 28 i 85 dniach dojrzewania. Dla każdej serii wytrzymałość na ściskanie obliczono na podstawie badań trzech próbek. Na rys. 1 przedstawiono wykresy słupkowe pokazujące wytrzymałość na ściskanie dla betonu wzorcowego oraz betonów z różnym dodatkiem kruszywa z żużla pomiedziowego.

Jak można zauważyć na wykresie na rys. 2 zastąpienie kruszywa naturalnego kruszywem z żużla pomiedziowego w mieszance betonowej powoduje nieznaczne zwiększenie wytrzymałości na ściskanie betonu dla dodatku kruszywa nie większego niż 50%. Dotyczy to wytrzymałości po 7, 28 i 85 dniach dojrzewania. Dodatek kruszywa z żużla pomiedziowego do 50% powoduje wzrost wytrzymałości 28-dniowej maksymalnie o 3%. Natomiast, gdy udział kruszywa z żużla pomiedziowego przekracza 50% następuje zauważalny spadek wytrzymałości na ściskanie. Spadek ten mieści się w granicach 12-14%. Uzyskane wyniki badań potwierdzają inne badania (12). Optymalna ilość kruszywa z żużla pomiedziowego w betonie pod względem wytrzymałości na ściskanie wynosi 40 - 50%. Uzyskane wyniki badań pokazują, że dodatek kruszywa z żużla pomiedziowego niezależnie od jego ilości może być z powodzeniem stosowany w praktyce. Na podstawie tych wyników badań można prognozować dalszy wzrost wytrzymałości i właściwości fizycznych betonu z dalszym upływem czasu.

3.2. Mrozoodporność

Badania mrozoodporności betonu przeprowadzono metodą zwykłą zgodnie z normą PN-88/B-06250 *Beton zwykły*. Badania wykonano na próbkach sześciennych o boku 100 mm. Według tej normy stopień mrozoodporności betonu jest osiągnięty, jeżeli po wymaganej w jego symbolu liczbie cykli zamrażania/rozmarzania próbek betonowych, spełnione zostaną następujące warunki: próbki nie wykazują spękań, rys, złuszczeń oraz odprysków, a łączna masa ubytków betonu w postaci zniszczonych narożników i krawędzi, odprysków itp. nie przekracza 5% masy próbek przed rozpoczęciem cykli zamrażania/odmrażania oraz spadek wytrzymałości na ściskanie w stosunku do wytrzymałości próbek niezamrażanych jest nie większy niż 20%. Liczbę cykli zamrażania

The results in Table 3 show that the increase in the amount of copper slag aggregate increases the fluidity of the concrete mix whose consistency changes from the S2 dense plastic consistency for the CS25 and CS50 mixes to the S3 plastic consistency for CS75 and CS100. This is the effect of the water demand of the aggregate, which decreases with the increase in the quantity of the copper slag aggregate. An increased amount of copper slag aggregate causes a slight increase in air content in the concrete mix. Increasing the amount of copper slag aggregate also causes an increase in the density of the concrete mix, which is the result of differences in the specific density of granite aggregate and copper slag aggregate.

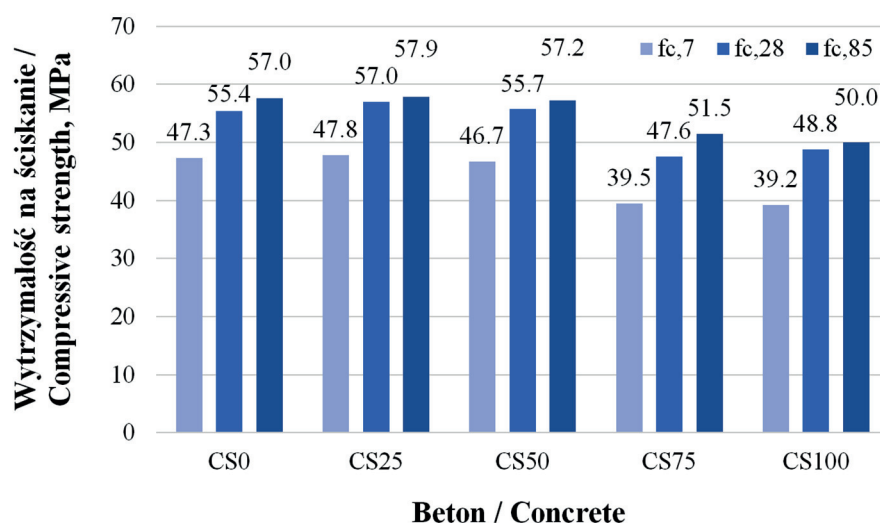
3. Results of hardened concrete tests

The studies on hardened concrete were aimed at determining the influence of the quantity of the copper slag aggregate on its compressive strength, freeze-thaw durability and water absorption. The results of these tests form the basis for assessing the possibility of using concrete exposed the effects of atmospheric conditions.

3.1. Compressive strength

The compressive strength tests were carried out on 150 mm x 150 mm x 150 mm cubic samples. The strength of concrete was tested after 7, 28 and 85 days of curing. For each batch, the compressive strength was calculated from three samples. Fig. 1 shows bar graphs illustrating the distribution of average compressive strength for control concrete and for concretes with different proportion of copper slag aggregate.

As can be seen in the diagram in Fig. 2, the replacement of natural aggregate by an aggregate from copper slag in the concrete mix results in a slight increase in the compressive strength of the concrete for up to 50%. This applies both to strength after 7, 28 and 85 days of maturation. The addition of copper slag aggregate up to 50% increases the 28-day strength by up to 3%. On the other



Rys. 2. Rozkład wytrzymałości na ściskanie 7-dniowej, 28-dniowej i 85 dniowej.

Fig. 2. Compressive strength distribution after 7 days, 28 days and 85 days.

i rozmrażania zwiększono do 150 przyjmując, że beton będzie cyklicznie zamrażany i rozmrażany w wodzie oraz będzie narażony na oddziaływanie soli odladzających. W tablicy 4 zestawiono wyniki badań mrozoodporności badanych betonów.

Wyniki badań mrozoodporności zamieszczone w tablicy 4 pokazują, że beton bez i z kruszywem z żużla pomiedziowego ma bardzo dobrą odporność na cykliczne działanie mrozu. Wszystkie betony osiągnęły stopień mrozoodporność F150. Betony z kruszywem z żużla pomiedziowego wykazują nieznaczny spadek wytrzymałości na ściskanie, w porównaniu z betonem wzorcowym.

3.3. Nasiąkliwość

Badania nasiąkliwości betonu wykonano zgodnie z normą PN-88/B-06250. Badanie nasiąkliwości betonu polega na określeniu ilości wody, którą beton jest zdolny zaabsorbować, aż do całkowitego wypełnienia porów. Nasiąkliwość wagowa definiowana jest jako stosunek masy wody wnikażącej do nasyconego materiału do jego masy suchej, co jest równoważne stosunkowi nasiąkliwości objętościowej do gęstości pozornej. Wyniki badań nasiąkliwości betonu zamieszczone są w tablicy 5.

Nasiąkliwość betonu z kruszywem z żużla pomiedziowego niezależnie od jego dodatku jest mniejsza od nasiąkliwości betonu wzorcowego, przy czym różnice w wynikach są niewielkie i mieszczą się w granicach błędów metody pomiarowej. Wg. normy PN-88/B-06250 *Beton zwykły* nasiąkliwość nie powinna być większa niż 5% w przypadku betonów narażonych bezpośrednio na działanie czynników atmosferycznych i 9% w przypadku betonów osłoniętych przed bezpośrednim działaniem czynników atmosferycznych. W obiektach mostowych nasiąkliwość betonu, przed zmianami w Rozporządzeniu (13) w ubiegłym roku, nie może przekraczać 5%. Nasiąkliwość betonu wywołuje wiele dyskusji dotyczących zarówno interpretacji wyników, jak i stawianych wymagań (14, 15). Wyniki badań (15) wykazały, że betony o nasiąkliwości mniejszej niż 4% nie przechodziły pozytywnie testu mrozoodporności. Z kolei betony, których nasiąkliwość wagowa znacznie przekraczała 5%, spełniały wymagania mrozoodporności i wodoszczelności z dużym zapasem. Wyniki prezentowanych badań pokazują, że nawet dla nasiąkliwości bliskiej 6% można uzyskać stopień mrozoodporności F150. W obowiązującym Rozporządzeniu (13) zrezygnowano z wymagań nasiąkliwości wobec betonu w obiektach mostowych.

4. Podsumowanie i wnioski

Wszystkie wykonane badania pozwalają na pozytywną ocenę możliwości wykorzystania kruszywa z żużla pomiedziowego do produkcji betonu. Kruszywo to ma dobre właściwości i spełnia wymagania dla kruszyw stosowanych w betonie. Należy jednak dokonać głębszych analiz wpływu

hand, when the share of copper slag aggregate exceeds 50%, there is a noticeable decrease in compressive strength. The drop is in the range of 12-14%. The obtained results are confirmed in other studies (12). The optimal content of aggregate in concrete in terms of compressive strength is 40 - 50%. The results obtained show that the addition of copper slag aggregate, regardless of its quantity, can be successfully used in practice. On the basis of these research results it is possible to predict a further increase in the strength and physical properties of concrete, over time.

3.2. Freeze-thaw durability

The tests of concrete freeze-thaw durability were carried out using the standard method according to PN-88/B-06250 *Conventional concrete*. The tests were performed on 100x100x100mm cubic samples. According to this standard, the freeze-thaw durability of concrete for a given number of cycles is achieved if the following conditions are met: the samples do not show cracks, scratches, scaling or chipping and the total mass of concrete losses in the form of damaged corners and edges, chipping, etc. does not exceed 5% of the mass of the samples before the start of the freeze/thaw cycles, and the loss of compression strength in relation to the strength of unfrozen samples is not higher than 20%. The number of freezing and thawing cycles was set to be 150, assuming that in practice, the investigated concrete will be cyclically frozen and thawed in water and will be exposed to the de-icing salts. Table 4 presents the results of freeze-thaw durability tests of the tested concretes.

The results of the freeze-thaw durability tests presented in Table 4 show that concrete without and with copper slag aggregate has a very good resistance to cyclic frost action. All the concrete samples reached the F150 freeze-thaw durability level. The copper slag aggregate concrete is characterised by a slight decrease in compressive strength compared to the control concrete.

3.3. Absorbability

The concrete water absorption tests were performed in accordance with the PN-88/B-06250 standard. A concrete water absorption test consists in determining the amount of water that the concrete is capable of absorbing, until the accessible pores are completely filled. Water absorption by mass is defined as the ratio of the mass of water penetrated to saturated material to its dry matter, which is equivalent to the ratio of water absorption by volume to apparent density. The results of the concrete water absorption tests are shown in Table 5.

Tablica 4 / Table 4

WYNIKI BADAŃ MROZOODPORNOŚCI

FREEZE-THAW DURABILITY TESTING RESULTS

Skład betonu / Concrete composition	CS0	CS25	CS50	CS75	CS100
Ubytek masy / Loss of mass, %	0.12	0.00	0.00	0.09	0.02
Spadek wytrzymałości / Strength decrease, %	-0.1	1.4	4.0	2.5	1.6

właściwości kruszyw na mieszankę betonową. O ile zawartość kruszywa z żużla pomiedziowego nie ma znaczącego wpływu na zawartość powietrza w mieszance betonowej, to dużym problemem okazuje się być wpływ ilości kruszywa pomiedziowego na konsystencję mieszanki betonowej. Decydujący wpływ na konsystencję mieszanki betonowej ma wodożądność kruszywa z żużla pomiedziowego, dlatego koniecznym powinno być uwzględnienie wodożądności kruszywa z żużla pomiedziowego w procesie projektowania mieszanki betonowej. W przypadku zwiększania dodatku kruszywa pomiedziowego o mniejszej wodożądności niż kruszywo granitowe, w składzie mieszanki betonowej wzrasta stosunek w/c, co może spowodować zmniejszenie wytrzymałości betonu. Co istotne, kruszywo pomiedziowe nie wpływa na zwiększenie nasiąkliwości betonu, a nawet powoduje jej zmniejszenie. Wprawdzie spadki oscylują na poziomie maksymalnie około 3,3% i trudno jest określić, czy różnice nie wynikają jedynie z błędów powstałych przy zagęszczaniu próbek.

Podczas określania wytrzymałości na ściskanie odnotowano tendencję najpierw do wzrostu, a później do spadku wytrzymałości wraz ze wzrostem procentowej zawartości kruszywa z żużla pomiedziowego. Należałoby dokonać dodatkowych oznaczeń wytrzymałości na ściskanie dla innych zawartości kruszywa pomiedziowego, w celu zoptymalizowania jego ilości w mieszance betonowej.

Na podstawie przeprowadzonych badań można sformułować następujące wnioski:

- Konsystencja mieszanki betonowej zwiększa się wraz ze zwiększaniem dodatku kruszywa z żużla pomiedziowego.
- Wszystkie zaroby uzyskały projektowaną zawartość powietrza w mieszance betonowej.
- Zawartość powietrza zwiększa się wraz ze zwiększaniem dodatku kruszywa z żużla pomiedziowego.
- Wszystkie betony badane po 28 dniach spełniły wymagania co do wytrzymałości na ściskanie. Dla betonów o zawartości kruszywa z żużla pomiedziowego do 50% nastąpiło zwiększenie średniej wytrzymałości badanej serii. Dla betonów oznaczonych symbolem CS75 i CS100 odnotowano spadki na poziomie około 14% średniej wytrzymałości na ściskanie. Spadki te nie powodują jednak zmiany klasy betonu i nadal badane betony odpowiadają projektowanej klasie C30/37.
- Badane betony bez i z kruszywem z żużla pomiedziowego mają podobną nasiąkliwość.
- Beton wzorcowy posiada największą odporność na działanie mrozu. Podczas badania betonu CS0 uzyskano niewielki przyrost wytrzymałości po badaniu. Pozostałe betony spełniły wymagania normy i nie wykazały nadmiernego spadku wytrzymałości betonu na ściskanie po badaniu. Uzyskane wartości są zadowalające i nie stanowią zagrożenia dla trwałości betonu. Warto jednak zwrócić uwagę na to, iż betony CS75 i CS100 z dużą ilością kruszywa z żużla pomiedziowego nie wykazują

Tablica 5 / Table 5

WYNIKI BADAŃ NASIĄKLIWOŚCI

WATER ABSORPTION TESTING RESULTS

Skład betonu / Concrete composition	CS0	CS25	CS50	CS75	CS100
Nasiąkliwość / Absorbability, %	6.0	5.8	5.9	5.9	5.9

The water absorption of concrete, regardless the quantity of aggregate, is lower than that of the control concrete, with minor differences in results and within the error limits of the measuring method. According to PN-88/B-06250 *Conventional concrete* the water absorption of concrete should not exceed 5% in the case of concretes directly exposed to weather conditions and 9% in the case of concretes shielded from direct weather conditions. In bridges, concrete water absorption, before the amendments to the Regulation (13) announced last year, must not exceed 5%. The water absorption of concrete causes a lot of discussions concerning both the interpretation of the results and the requirements (14,15). The results of the tests (15) showed that concrete with water absorption below 4% did not pass the freeze-thaw durability test. In turn, concretes whose water absorption by mass significantly exceeded 5% met the requirement for freeze-thaw durability and water resistance with a large reserve. The results of the presented studies show that even for water absorption close to 6%, the degree of freeze-thaw durability of F150 can be obtained. In the current Regulation (13), the requirements for water absorption of concrete in bridges are abandoned.

4. Summary and conclusions

All the tests carried out allow for a positive assessment of the possibility of using copper slag aggregate for concrete production. This aggregate has good parameters and meets the requirements of aggregates used for concrete. However, the influence of the properties of aggregates on the concrete mix should be further analysed. While the content of copper slag aggregate does not have a significant impact on the air content of the concrete mix, the impact of the content of copper slag aggregate on the consistency of the concrete mix proves to be a major problem. The water demand of copper slag aggregate may be important for the consistency of the concrete mix, and it seems appropriate to consider the water demand of copper slag aggregate in the concrete mix design process. If there is an increase in the quantity of copper slag aggregate with a lower water demand than granite aggregate, the w/c ratio increases in the concrete mix, which may result in a decrease in concrete strength. An important feature is that copper slag aggregate does not increase the water absorption of concrete, it even reduces it. Although the drops are at a maximum of about 3.3% and it is difficult to determine if the differences are not due solely to errors in sample compacting.

When determining the compressive strength, there was a tendency initially for an increase and then for a decrease in strength with an increase in the percentage of copper slag aggregate. Additional

dużego spadku wytrzymałości na ściskanie po badaniu mrozoodporności.

- Gęstość betonu i mieszanki betonowej jest typowa dla betonów, w których stosuje się dodatek kruszywa o większej gęstości niż kruszywo użyte do projektowania wzorcowej mieszanki betonowej.
- Uzyskane wyniki badań kruszyw potwierdziły ich przydatność do zastosowania w betonie cementowym. Kruszywo z żużla pomiedziowego często wykazywało lepsze właściwości niż użyte w betonie wzorcowym kruszywo granitowe.

Literatura / References

1. Ł. Machniak, W. Koziół W, Kruszywa alternatywne - baza zasobowa i kierunki wykorzystania w budownictwie, *Kruszywa*, **4/2014**, 28-33 (2014).
2. S. Góralczyk, D. Kukielska, Kruszywa pomiedziowe a naturalne - które lepsze?, *Kruszywa*, **1/2010**, 39-44 (2010).
3. A. Duszyński, W. Jasiński, A. Pryga-Szulc, Ocena i wykorzystanie kruszywa z pomiedziowego żużla granulowanego do mieszanek grunto-wo-kruszywowych, *Biuletyn Państwowego Instytutu Geologicznego*, **469**, 85-92 (2017).
4. P. Gembal, Kruszywa z żużla powstającego przy produkcji miedzi i możliwości ich wykorzystania w świetle wymagań ochrony środowiska, *Prace Instytutu Ceramiki i Materiałów Budowlanych*, **27**, 85-94 (2016).
5. K.S.-Jabri, A.S. Al-Saidy, R. Taha, Effect of copper slag as a fine aggregate on the properties on cement mortar and concrete, *Constr. Build. Mater.* **25**, 933-938 (2011).
6. P.S. Ambily, C. Umarani, K. Ravisankar, P.P. Prem, B.H. Bharatkumar, N.R. Iyer, Studies on ultra-high performance concrete incorporating copper slag as fine aggregate, *Constr. Build. Mater.*, **77**, 233-240 (2015).
7. Anbarasan, uthaya Banu, Replacing river sand with granulated copper slag in cement, *Int. J. Sci. Eng. Res.* **7(5)**, 1415-1423 (2016).
8. Z.K. Sambhaji, P.B. Autade. Effect of copper slag as a fine aggregate on properties of concrete, *Int. Res. J. Eng. Techn.* **3(6)**, 410-414 (2016).
9. A. Shyam, A. Anwar, S.A. Ahmad, Experimental study on the behavior of copper slag as partial replacement of fine aggregate, *Int. J. Res. Appl. Sci. Eng. Techn.* **5 (IV)**, 1465-1474 (2017).
10. R.S. Edwin, M. De Schepper, E. Gruyaert, N. De Belie, Effect of secondary copper slag as cementitious material in ultra-high performance mortar, *Constr. Build. Mater.* **119**, 31-44 (2016).
11. C. Shi, J. Qian, High performance cementing materials from industrial slags - a review, *Resour. Conserv. Recy.* **29**, 195-207 (2000).
12. A.M. Rashad, A brief review on blast-furnace slag and copper slag as fine aggregate in mortar and concrete based on Portland cement, *Reviews on Advanced Materials Science*, **44**, 221-237 (2016).
13. Rozporządzenie Ministra Transportu i Gospodarki Morskiej z dnia 30 maja 2000 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać drogowe obiekty inżynierskie i ich usytuowanie (Dz. U. 2000 nr 63 poz. 735 wraz z późniejszymi zmianami).
14. A. Gołda, S. Kaszuba, Nasiąkliwość betonu - wymagania a metody badawcze, *Cement Wapno Beton*, **14**, 308-313 (2009).
15. P. Kamiński, Wpływ nasiąkliwości na trwałość betonu cementowego, *Materiały Budowlane*, **495**, 102-103 (2013).

compressive strength determinations should be carried out for other contents of the copper slag aggregate in order to optimise its quantity in the concrete mix.

The following conclusions can be drawn from the studies carried out:

- The consistency of the concrete mix increases with the increase of the percentage of the copper slag aggregate.
- All the batches met the designed air content in the concrete mix.
- The air content increases as the content of the copper slag aggregate increases.
- All the concretes tested after 28 days met the concrete strength requirements. For the concrete with an aggregate content of up to 50%, the average strength of the tested series increased. For the concretes marked CS75 and CS100, drops of about 14 % of the average compressive strength were recorded. However, these drops do not change the concrete class and the tested concrete still corresponds to the designed class of C30/37.
- The tested concrete without and with copper slag aggregate is characterised by a similar water absorption.
- The reference concrete has the best freeze-thaw durability. During testing of the CS0 concrete a small increase in strength was obtained after the test. The remaining concretes met the requirements of the standard and did not show an excessive decrease in the compressive strength of concrete after testing. The values obtained are satisfactory and do not pose a threat to the durability of the concrete. It is worth noting, however, that the CS75 and CS100 concretes with a large content of copper slag aggregate do not show a large decrease in compressive strength after freeze-thaw durability testing.
- The density of concrete and concrete mix is typical for concretes that use increasingly more aggregate with a higher density than the basic concrete mix designed.
- The obtained results of aggregate testing confirmed their suitability for use in cement concrete. The copper slag aggregate often showed better properties than the granite aggregate used in the basic batch.