

## OCENA I WYKORZYSTANIE KRUSZYWA Z POMIEDZIOWEGO ŻUŻLA GRANULOWANEGO DO MIESZANEK GRUNTOWO-KRUSZYWOWYCH

### AGGREGATES FROM GRANULATED COPPER SLAG AS A COMPONENT FOR ROAD CONSTRUCTION MIXTURES

ANDRZEJ DUSZYŃSKI<sup>1</sup>, WIKTOR JASIŃSKI<sup>1</sup>, ANETA PRYGA-SZULC<sup>1</sup>

**Abstrakt.** Przedmiot artykułu stanowią kruszywa pomiedziowe z żużla granulowanego, jak również kruszywa ze zużytego ścierniwa żużlowego powstałego na bazie pomiedziowego żużla granulowanego. Celem artykułu jest wskazanie na różne możliwe technologie do stosowania w budownictwie drogowym w zależności od zasadniczych i specyficznych właściwości tych kruszyw. Przedstawione wyniki badań potwierdzają potrzebę stosowania kruszywa z pomiedziowego żużla granulowanego w mieszankach niezwiązanych i związanych spoiwami i lepiszczami oraz niezwiązanych gruntowo-kruszywowych.

**Słowa kluczowe:** pomiedziowy żużel granulowany, kruszywo, mieszanka.

**Abstract.** The paper deals with aggregates from granulated copper slags. The purpose of this article is to indicate the various technologies for use in road construction, for both granular slag aggregate and aggregates from copper slag waste abrasives, depending on the essential and specific properties of these aggregates. The presented results confirm the need to use granulated copper slag in soil and aggregate mixtures.

**Key words:** granulated copper slag, aggregate, aggregate mixture.

### PRZEGLĄD INFORMACJI DOTYCZĄCYCH POMIEDZIOWYCH ŻUŻLI GRANULOWANYCH

#### POWSTAWANIE

Żużel z pieca elektrycznego powstaje w Hucie Miedzi Głogów II. Żużel granulowany uzyskuje się przez skierowanie płynnego żużla po opuszczeniu pieca elektrycznego do układu granulacji wyposażonego w wodne dysze granulacyjne. W wyniku gwałtownego rozbicia i schłodzenia strugi żużla strumieniem wody powstaje sypki materiał nazywany żużlem granulowanym. Uzyskany w ten sposób materiał ma strukturę bezpostaciową (Gambal, 2013).

#### SKŁAD CHEMICZNY

Prace badawcze nad żużlem granulowanym, dotyczące głównie właściwości żużli i ewentualnych sposobów ich zagospodarowania, prowadzone były w Instytucie Metali Nieżelaznych w Gliwicach (Gambal, 2013). Skład chemiczny żużla granulowanego zamieszczono w [tabeli 1](#) (dane z 1993 r.) (Speczik i in., 2003). Zależy on głównie od zastosowanej technologii produkcji miedzi, składu chemicznego użytych do produkcji koncentratów, ilości krzemionki

<sup>1</sup> Instytut Badawczy Dróg i Mostów – Filia Wrocław, 55-140 Żmigród; e-mail: aduszynski@ibdim.edu.pl, wjasinski@ibdim.edu.pl, apryga@ibdim.edu.pl.

**Tabela 1****Skład chemiczny pomiedziowego żużla granulowanego z Huty Miedzi Głogów II (Speczik i in., 2003)**Chemical composition of granulated copper slag from Copper Foundry Głogów II (Speczik *et al.*, 2003)

Składniki	Zawartość [%]	Składniki	Zawartość [%]
Pb	0,89	Zn	0,59
Cu	0,63	Ag	6 [g/Mg]
As	0,007	Fe	5,39
Na <sub>2</sub> O	0,67	Ni	0,01
Co	0,04	S (og.)	0,021
K <sub>2</sub> O	3,74		

stosowanej podczas produkcji oraz ilości dodawanego wapnia i glinu do stabilizacji struktury żużla. W tabeli 2 przedstawiono składy tlenkowe żużli pomiedziowych (Gambal, 2013; Kuterasińska, Król, 2014) oraz składy tlenkowe z pomiedziowego żużla granulowanego (Unitrade, 2007; Kuterasińska, Król, 2014; Karta charakterystyki IMN, 2017).

Żużel granulowany jest syntetycznym materiałem amorficznym, w którym SiO<sub>2</sub> jest związany w postaci kompleksowych związków krzemu i jest odporny na działanie mrozu (Speczik i in., 2003).

Głównymi składnikami żużla pomiedziowego są kompleksowe, bezpostaciowe związki tlenkowe typowych składników szkłotwórczych, główną fazę stanowi CaMgSiO<sub>2</sub> oraz Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> i 3CaOSiO<sub>2</sub>, przy czym krzemionka jest w stanie związanym (Karta charakterystyki IMN, 2017).

Żużel pomiedziowy ma charakter kwaśny, a jego zasadniczymi składnikami są SiO<sub>2</sub>, CaO, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> i żelazo, głównie w postaci Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, FeO oraz częściowo w formie metalicznej. Zawartość MgO zazwyczaj nie przekracza 8%, a siarki – 1% (Kuterasińska, Król, 2014). Zawartość siarki w przeliczeniu na SO<sub>3</sub> wynosi od 0,09 do 0,72% (Speczik i in., 2003). Charakteryzuje się on małą zmiennością składu chemicznego, co jest pozytywną cechą z punktu widzenia zastosowań technologicznych. Skład chemiczny żużla jest jakościowo podobny do składu cementu. Ze względu na udziały CaO, SiO<sub>2</sub> i Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> jest zbliżony do żużla wielkopieczowego. Zasadnicza różnica dotyczy zawartości żelaza, która w żużlu pomiedziowym jest kilkukrotnie wyższa. Od dodatków pucolanowych odróżnia go niższa zawartość SiO<sub>2</sub> oraz znacznie wyższa – CaO i MgO (Kuterasińska, Król, 2014).

Udział chlorków w postaci związków rozpuszczalnych w wodzie jest mniejszy niż 0,025%, a wolnej krzemionki – poniżej 1%. Zawartość fazy szklistej w próbkach żużla pomiedziowego granulowanego wynosi 100,00% (Kuterasińska, Król, 2014).

**WŁAŚCIWOŚCI TECHNICZNE ŻUŻLA GRANULOWANEGO**

Żużel granulowany charakteryzuje gęstość od 2,6 do 3,2 g/cm<sup>3</sup> oraz gęstość nasypowa w stanie zagęszczonym od 1,550 do 1,890 kg/m<sup>3</sup> (Speczik i in., 2003). Ziarna żużla granulowanego posiadają ostre krawędzie.

**ZANIECZYSZCZENIA W WYCIĄGU WODNYM**

Żużel granulowany wg Speczika i in. (2003) nie zawiera wolnej krzemionki, cząstek metali, soli kwasów oraz składników rozpuszczalnych w wodzie. Charakteryzuje się znaczną rozpiętością wyników w zakresie sumarycznego stężenia metali (Pb, Cu, Cd, As, Cr) w związkach rozpuszczalnych w wodzie, w granicach od 0,56 do 239,11 mg/kg żużla.

W artykule Rzechuły (1994) podaje się informacje związane z takimi składnikami jak: Zn, Cu i Pb w wykorzystanym ścierniwie z żużla pomiedziowego, których wyciągi wodne nie są inertne z uwagi na zawartość frakcji pylastych pochodzących z materiałów oczyszczanych, z powłok malarskich wapiennych lub zawierających Zn.

**PRODUKCJA**

W polskim przemyśle miedziowym rocznie powstaje ponad 1,3 mln t produktów ubocznych, z czego ok. 94,6% ogólnej ilości wytworzonych odpadów stanowi szybowy i granulowany żużel pomiedziowy, przy czym żużel szybowy stanowi ok. 73% całkowitej produkcji żużla. Obecnie produkcja granulowanego żużla pomiedziowego sięga ok. 400 tys. t rocznie i w najbliższym czasie wzrośnie do ok. 1 mln t w ciągu roku. Jest to spowodowane tym, że w polskim przemyśle miedziowym dąży się do ujednoczenia technologii oraz zwiększenia produkcji miedzi, czego następstwem będzie wzmożona produkcja żużla granulowanego z pieca elektrycznego (Kuterasińska, Król, 2014).

**Tabela 2****Tlenkowy skład chemiczny żużli pomiedziowych [%]**

(wg: Unitrade, 2007; Gambal, 2013; Kuterasińska, Król, 2014; Karta charakterystyki IMN, 2017)

Oxide chemical composition of copper slag [%]

(according to: Unitrade, 2007; Gambal, 2013; Kurterasińska, 2014; Karta charakterystyki IMN, 2017)

Rodzaj żużla	SiO <sub>2</sub>	CaO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	SO <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O
Żużel pomiedziowy	39–44 37–40	19–19,6 8–30	13,5 15,7–47,2	– –	12,8–14,8 5–16	5,6 1,5–8	0,65	–
Żużel granulowany	35,24	21,27	18,57	–	12,31	7,77	0,16	–
Materiał ścierny	32–46	18,5–29	–	4,5–6	10–14,5	8,0–12,5	–	–
	41,36–2,18	19,42–21,19	9,48–12,23		10,78–13,91	6,66–7,13	0,68–0,69	0,66–0,72

## ZASTOSOWANIA

Żużel granulowany jest głównie wykorzystywany jako:

- ścierniwo do prac strumieniowo-ściernych przede wszystkim w przemyśle stoczniowym;
- składnik podsadzki hydraulicznej w górnictwie do wypełniania wyrobisk podziemnych;
- do prac rekultywacyjnych (Gambal, 2013; Milewska, Żabińska, 2014).

Największe zużycie pomiedziowego żuźla granulowanego (ok. 50%) wiąże się z pracami podsadzkowymi. W tych zastosowaniach żużel granulowany stanowi alternatywę dla naturalnych piasków (Milewska, Żabińska, 2014).

Jednocześnie badania potwierdziły możliwość wykorzystania żuźla granulowanego w budownictwie jako kruszywa, wypełniacza mas bitumicznych i do wytwarzania betonu (Milewska, Żabińska, 2014).

### Możliwości innowacyjnych zastosowań

Możliwości zastosowań, poza podstawowymi, podanyymi powyżej, określa dostępność żuźla granulowanego, jego skład i właściwości oraz względy ekonomiczne i ekologiczne (Gambal, 2013). Przedstawia się również przydatność żuźla granulowanego w różnych zakresach, np.:

- zastosowanie jako ochrona otoczenia przed silnymi źródłami promieniowania, takimi jak: akceleratory medyczne lub przemysłowe, reaktory jądrowe itp. (Milewska, Żabińska, 2014) – przetopiony żużel granulowany pochłania promieniowanie  $\gamma$  (gama) skuteczniej niż beton barytowy o gęstości  $3,2 \text{ g/cm}^3$ ;
- do produkcji kruszyw oraz galanterii budowlano-drogowej (krawężniki, kostka brukowa, płytki przemysłowa podłogowa) (Milewska, Żabińska, 2014);
- składnik kompozytów cementowych z wykorzystaniem alkalicznej aktywacji granulowanego żuźla pomiedziowego przy wykorzystaniu szkła wodnego – współczynnik zasadowości dla żuźla granulowanego na podstawie Kuterasińskiej i Król (2014) oraz przeliczeń tlenków z tabeli 2 może wynosić od 0,94 do 1,2;
- jako spoiwa hydrauliczne (Kuterasińska, Król, 2014).

### ZASTOSOWANIE KRUSZYWA Z POMIEDZIOWEGO ŻUŻLA GRANULOWANEGO JAKO SKŁADNIKA MIESZANEK W DROGOWNICTWIE

Kompleksowe zastosowanie kruszywa z pomiedziowego żuźla granulowanego obejmuje dwa produkty:

- kruszywo z pomiedziowego żuźla granulowanego;
- kruszywo ze zużytego kruszywa z pomiedziowego żuźla granulowanego.

Kruszywo ze zużytego kruszywa z pomiedziowego żuźla granulowanego jest zużytym materiałem ściernym. Frakcją użyteczną do produkcji materiału ściernego są frakcje z zakresu  $0,2(0,4) \div 2,8 \text{ mm}$ . Kruszywo polgřit jako materiał

ścierny jest produkowany przez Instytut Metali Nieżelaznych (IMN) Oddział w Legnicy na bazie kruszywa z pomiedziowego żuźla granulowanego pochodzącego z KGHM Polska Miedź S.A. Powstające kruszywo ze zużytego kruszywa polgřit może być utylizowane przez IMN lub przez specjalistyczne jednostki uprawnione w zakresie budowy dróg.

Zasadnicza różnica pomiędzy tymi dwoma kruszywami dotyczy:

- uziarnienia:
  - kruszywo z pomiedziowego żuźla granulowanego to kruszywo frakcji 0/5 mm;
  - kruszywo ze zużytego materiału ściernego to kruszywo (w zależności od frakcji użytecznej materiału ściernego) frakcji nawet 0/8 mm o zwiększonej zawartości materiału pochodzącego z piaskowania określonej konstrukcji, również we frakcji pylastej;
- składu chemicznego, w przypadku kruszywa ze zużytego kruszywa, zależnego od rodzaju materiału konstrukcji piaskowanych (metalowe, betonowe) i ich pokrycia (farby na bazie wypełnienia mineralnego, ocynk) m.in. konstrukcji metalowych i betonowych.

Dla kruszywa ze zużytego ścierniwa polgřit zostały wydane:

- Aprobata Techniczna IBDiM Nr AT/2007-03-1272 „Kruszywo ze zużytego ścierniwa żużlowego POLGRIT-IMN”;
- wznowiona w 2012 r. Aprobata Techniczna IBDiM Nr AT/2007-03-1272/1 „Kruszywo sztuczne z żuźla pomiedziowego do niezwiązanych i związanych hydraulicznie materiałów do dróg. Kruszywo ze zużytego ścierniwa POLGRIT-IMN”.

Od 2001 roku były prowadzone badania kruszywa ze zużytego żuźla granulowanego przez Instytut Badawczy Dróg i Mostów (IBDiM) – Filię Wrocław. Badania te dotyczyły kruszyw pochodzących z czyszczenia różnych powierzchni, wraz z określeniem przydatności i możliwości zastosowania zużytego ścierniwa z żuźli z hutnictwa miedzi do produkcji kruszyw w celu użycia ich w budownictwie drogowym. Efektem tych prac było określenie zakresu właściwości kruszywa ze zużytego żuźla granulowanego oraz wstępne zalecenia do wykonania mieszanek.

W zależności od wyników badań podstawowych i miejsca zastosowania w konstrukcji drogi należy przyjąć właściwą technologię wbudowania tych kruszyw:

- kruszywo stosowane samodzielnie,
- kruszywo ulepszone:
  - kruszywo stosowane w mieszance z innymi kruszywami,
  - kruszywo ulepszone spoiwami hydraulicznymi,
  - kruszywo stabilizowane cementem,
- kruszywa do podbudowy z piasków otaczanych asfaltem.

Obecnie, od 2017 roku, dla kruszyw sztucznych obowiązują normy PN-EN lub Krajowe Oceny Techniczne.

## WYNIKI BADAŃ

W niniejszym artykule w tabelach od 3 do 5 zamieszczono wyniki badań kruszywa pomiedziowego z żużla granulowanego 0/5 mm z roku 2012, wykonane w IBDiM – Filii Wrocław i zawarte w Sprawozdaniu z Badań Nr 13225/GS, 2012. W sprawozdaniu tym przyporządkowano również dla kruszywa pomiedziowego z żużla granulowanego kategorii badanych właściwości lub określono je jako deklarowane, jeżeli w normie nie podano kategorii.

W niniejszym artykule odniesiono się do niektórych wyników badań zawartych w Sprawozdaniu z Badań Nr 13225/GS, 2012.

### UZIARNIENIE

Badania uziarnienia i zawartości pyłów przeprowadzono wg norm PN-EN 933-1:2000; PN-EN 933-1:2000/A1:2006 (tab. 3; fig. 1). Kruszywo pomiedziowe z żużla granulowanego 0/5 mm charakteryzuje się niewielką zawartością pyłów. Obliczona wartość współczynnika różnorodności równa  $U = d_{60}/d_{10} = 3$  wskazuje wg PN-S-02205:1998, że kruszywo charakteryzuje się wartością graniczną pod względem przydatności do budowy nasypów – jako wartości klasyfikacyjnej zagęszczalność. W przypadku zmniejszenia się nadziarna lub zawartości frakcji na dolnych sitach przesiewu, kruszywo to może nie spełnić tego warunku różnoziarnistości i wy-

magać sprawdzenia na poletku doświadczalnym. Oceniane kruszywo nie spełnia wymagań dla górnej warstwy nasypu o grubości co najmniej 0,5 m, z uwagi na wymagany wskaźnik różnoziarnistości  $U$  równy co najmniej 5. W związku z powyższym zastosowanie kruszywa pomiedziowego z żużla granulowanego 0/5 mm do górnych warstw nasypu wymaga jego ulepszenia spoiwem (cementem, wapnem lub aktywnymi popiołami), o grubości warstwy i sposobie ulepszenia według określeń w dokumentacji projektowej.

### GĘSTOŚĆ ZIARN I NASIĄKLIWOŚĆ

W tabeli 4 zamieszczono wyniki badania gęstości ziarn i nasiąkliwości kruszywa pomiedziowego z żużla granulowanego 0/5 mm. Wartość nasiąkliwości jest niska. Dla typowych piasków naturalnych drobnych i średnich dolna granica typowego zakresu wilgotności optymalnej wynosi 8% ( $m/m$ ). Nasiąkliwość wg PN-EN 1097-6 wiąże się z objętościową zawartością nasączonej wody na powierzchni ziarna i wody zatrzymanej w porach do całkowitej objętości ziarna, która wynosi 1,7% ( $v/v$ ).

Badanie nasiąkliwości potwierdza możliwą niestabilność kruszywa pomiedziowego z żużla granulowanego 0/5 mm po wyschnięciu w warunkach budowy lub trudności w zagęszczeniu.

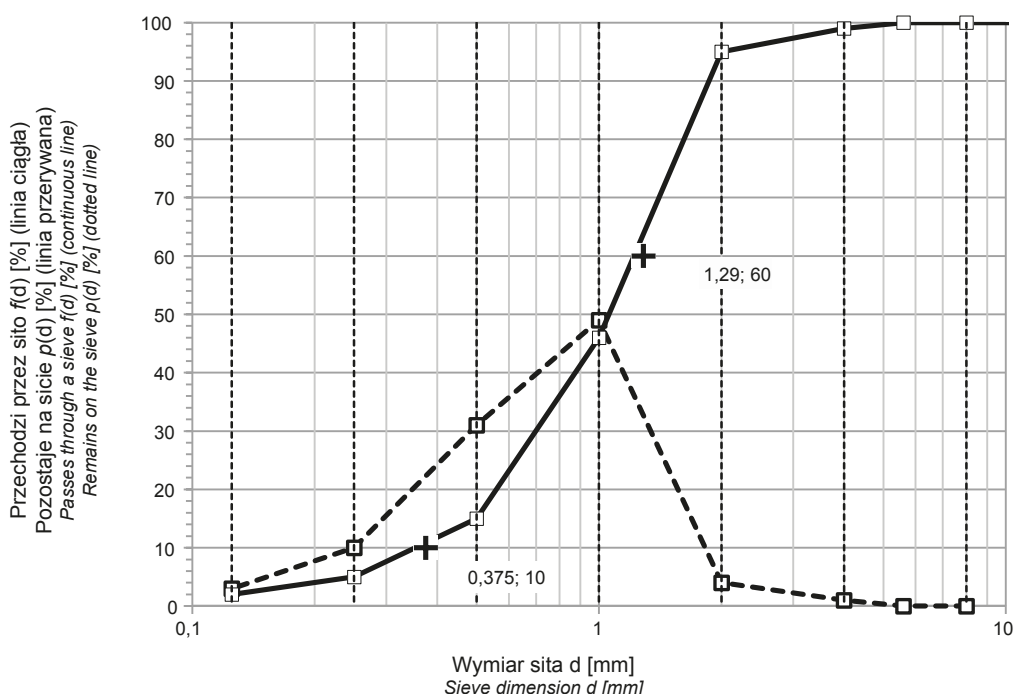


Fig. 1. Wykres uziarnienia kruszywa pomiedziowego z żużla granulowanego 0/5 mm

Obliczenia:  $d_{10} = 0,375$  mm;  $d_{60} = 1,29$  mm;  $U = d_{60}/d_{10} = 3$

Granulation chart of aggregate 0/5 mm from granulated copper slag

Calculations:  $d_{10} = 0,375$  mm;  $d_{60} = 1,29$  mm;  $U = d_{60}/d_{10} = 3$

Tabela 3

**Wyniki badania uziarnienia i zawartości pyłów  
kruszywa pomiedziowego z żuźla granulowanego 0/5 mm  
wg PN-EN 933-1:2000; PN-EN 933-1:2000/A1:2006**

Results of granulation and dust content of aggregate  
from granulated copper slag 0/5 mm according to PN-EN 933-1:2000;  
PN-EN 933-1:2000/A1:2006

Lp.	Wymiary otworów sita [mm]	Krzywa uziarnienia [%]	Udział [%]
1.	11,2	100	–
2.	8	100	–
3.	5,6	100	–
4.	4	99	1
5.	2	95	4
6.	1	46	49
7.	0,5	15	31
8.	0,25	5	10
9.	0,125	2	3
10.	<0,125	–	2
Suma			100

Tabela 4

**Wyniki badań grubych frakcji – właściwości fizyczne**

The test results of coarse fractions – physical properties

Właściwości		Oznaczenie	Jednostka	Wynik	Metody badań według norm
Gęstość ziarn	gęstość objętościowa ziarn	$\rho_a$	Mg/m <sup>3</sup>	2,94	PN-EN 1097-6:2002 PN-EN 1097-6:2002/AC:2004 PN-EN 1097-6:2002:Ap1:2005
	gęstość ziarn wysuszonych w suszarce	$\rho_{rd}$	Mg/m <sup>3</sup>	2,89	
	gęstość ziarn nasyconych i powierzchniowo osuszonych	$\rho_{ssd}$	Mg/m <sup>3</sup>	2,91	
Nasiąkliwość kruszywa	WA <sub>24</sub>	% (m/m)	0,6		

Tabela 5

**Wyniki badań kruszywa pomiedziowego z żuźla granulowanego 0/5 mm  
wobec zastosowania do stabilizacji spoiwami drogowymi**

Results of analysis of aggregate from granulated copper slag 0/5 mm for use in stabilization with road binders

Właściwości		Oznaczenie	Jednostka	Wynik	Metody badań według norm
Zawartość pyłów		f	%	0,8	PN-EN 933-1:2000 PN-EN 933-1:2000/A1:2006
Jakość pyłów – wskaźnik piaskowy		SE	–	94	PN-EN 933-8:2001
Grube zanieczyszczenia lekkie		m <sub>LPC</sub>	%	0,0	PN-EN 1744-1:2010
Zawartość siarki całkowitej		S	%	0,1	
Zawartość siarczanów rozpuszczalnych w kwasie		AS	%	0,2	
Składniki zmieniające czas wiązania i twardnienia cementu	względna wytrzymałość na ściskanie	–	%	106	
	zwiększenie czasu wiązania cementu	–	min.	15	

## WŁAŚCIWOŚCI ZWIĄZANE Z ZASTOSOWANIEM DO STABILIZACJI SPOIWAMI DROGOWYMI

Kruszywo pomiedziowe z żużla granulowanego 0/5 mm nie zawiera zanieczyszczeń obcych i organicznych oraz charakteryzuje się małą zawartością siarki (tab. 5). Na podstawie wyniku badania wskaźnika piaskowego kruszywo nie zawiera składników glinopodobnych, co również potwierdza

badanie składników pod względem czasu wiązania i twardnienia cementu.

Kruszywo z pomiedziowego żużla granulowanego 0/5 mm nie spełnia wymagań odnośnych ulepszonego podłoża pod względem uziarnienia dla mieszanki CBGM 0/8 (wg WT-5 2010); wymaga doziarnienia w zakresie frakcji pylastych (fig. 2).

## PODSUMOWANIE

Wyniki badań kruszyw wg norm PN-EN 13043, PN-EN 13242 i PN-EN 12620 są pomocne w określaniu kategorii dla danej właściwości. Na właściwą ocenę kruszyw do mieszank pozwalają dokumenty normalizacyjne (RRM, 2007; RMŚ, 2009; WT-1 2010, WT-4 2010, WT-5 2010, OST Nawierzchnia z betonu cementowego, 2014). Zarówno normy PN-EN 13043, PN-EN 13242 i PN-EN 12620 dla kruszyw, jak i dokumenty normalizacyjne dla kruszyw i mieszank kruszyw nie ujmują specyficznych właściwości praktycznie każdego kruszywa, które to są ściśle związane z ich zastosowaniem.

Przedstawione niektóre wyniki badań kruszywa pomiedziowego z żużla granulowanego 0/5 mm z zakresu norm PN-EN 13043, PN-EN 13242 i PN-EN 12620 potwierdzają potrzebę stosowania tego kruszywa w drogownictwie w mieszankach z uwagi na:

- niskie wartości:
  - zawartości frakcji poniżej 1 mm, współczynnika różnoziarnistości i nasiąkliwości, które powodują trudności przy zagęszczeniu i prowadzą do braku stabilności w dłuższym okresie po zagęszczeniu i podczas eksploatacji mieszanki niezwiązanej;

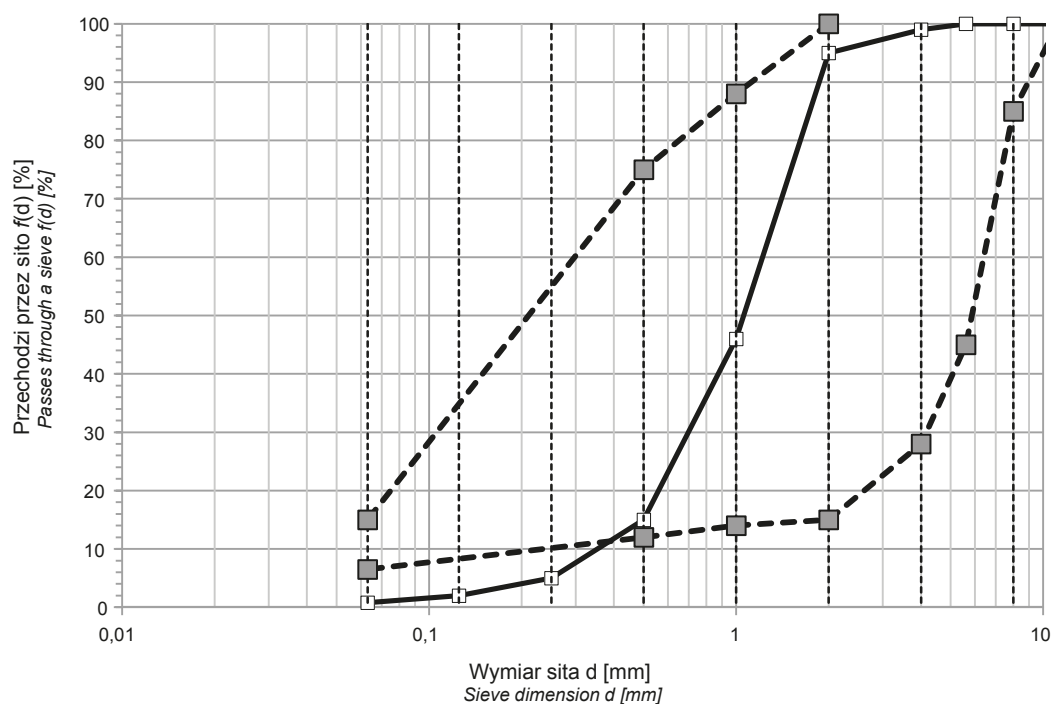


Fig. 2. Wykres uziarnienia kruszywa pomiedziowego z żużla granulowanego 0/5 mm w krzywych granicznych dla mieszanki CBGM 0/8 (linia przerywana) wg (WT-5 2010)

Gradation curve of aggregates from granulated copper slag 0/5 mm in boundary curves for CBGM 0/8 (dashed line) according to (WT-5 2010)



- zawartości frakcji poniżej 1 mm, które przy stabilizacji lub ulepszeniu będą wpływały na zwiększenie ilości spoiwa drogowego lub cementu;
  - wysokie wartości jak w przypadku wskaźnika piaskowego (94%) przy zastosowaniu do mieszanek niezwiązanych.
- W przypadku mieszanek związanych wymagana dolna kruszywa graniczna uziarnienia (fig. 2) zapewnia oszczędność

spoiwa, cementu przy mieszankach z brakującymi frakcjami drobnymi, w tym przypadku poniżej 1 mm.

Przedstawione wyniki badań podstawowych cech kruszywa z pomiedziowego żużla granulowanego i ich ocena potwierdzają potrzebę jego stosowania w niezwiązanych i związanych mieszankach gruntowo-kruszywowych.

## LITERATURA

- GAMBAL P., 2013 — Wpływ struktury żużla pomiedziowego z pieca elektrycznego na wybrane cechy matrycy cementowej [rozpr. doktor.]. Politechnika Poznańska, Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska, Poznań.
- KARTA CHARAKTERYSTYKI IMN, 2017 — Karta charakterystyki materiału ściernego polgрит, z dnia 2017-03-29. Instytut Metali Nieżelaznych, Legnica. Internet: <http://www.polgрит.com.pl> (dostęp: maj 2017).
- KUTERASIŃSKA J., KRÓL A., 2014 — Żużel pomiedziowy jako surowiec w produkcji alkalicznie aktywowanych spoiw żużlowych. *Pr. ICI MB*, 17: 21–36.
- MILEWSKA E., ŻABIŃSKA I., 2014 — Technologie utylizacji żużli metalurgicznych – studium literaturowe. *W: Systemy wspomagania w inżynierii produkcji. Inżynieria Systemów Technicznych*. Internet: [http://wydawnictwo.panova.pl/attachments/article/490/r18\\_2014\\_2.pdf](http://wydawnictwo.panova.pl/attachments/article/490/r18_2014_2.pdf) (dostęp: maj 2017).
- RZECUŁA J., 1994 — Gospodarcze wykorzystanie odpadowego ścierniwa z żużla pomiedziowego. *Fizykochemiczne Problemy Mineralurgii*, 28: 207–218.
- SPECZIK S., BACHOWSKI C., MIZERA A., GROTOWSKI A., 2003 — Stan aktualny i perspektywy gospodarki odpadami stałymi w KGHM Polska Miedź S.A. *W: Warsztaty 2003 z cyklu: „Zagrożenia naturalne w górnictwie”*: 155–177. IGSMiE PAN, Kraków.
- SPRAWOZDANIE Z BADAŃ Nr 13225/GS, 2012 — Wyniki badań kruszywa z żużla z pieca elektrycznego 0/5 mm EKO-REN, wykonane przez Laboratorium Badań Maszyn Robotycznych i Górniczych, Zakład górnictwa Skalnego, Instytut Mechanizacji Budownictwa i Górnictwa Skalnego w Warszawie, z dnia 29.09.2012 r.: 24–25 (wyniki badań udostępnione przez KGHM Metraco S.A.).
- UNITRADE, 2007 — strona internetowa firmy Unitrade Sp z o.o. w Gdańsku: [www.unitrade.pl](http://www.unitrade.pl) (dostęp: maj 2017).
- Normy**
- PN-S-02205:1998 Drogi samochodowe. Roboty ziemne. Wymagania i badania.
- PN-EN 12620 Kruszywa do betonu.
- PN-EN 13043 Kruszywa do mieszanek bitumicznych i powierzchniowych utrwaleń stosowanych na drogach, lotniskach i innych powierzchniach przeznaczonych do ruchu.
- PN-EN 13242+A1:2010 Kruszywa do niezwiązanych i związanych hydraulicznie materiałów stosowanych w obiektach budowlanych i budownictwie drogowym.
- PN-EN 933-1:2000; PN-EN 933-1:2000/A1:2006 Badania geometrycznych właściwości kruszyw – Część 1: Oznaczanie składu ziarnowego – Metoda przesiewania.
- PN-EN 933-6:2002+AC:2004; PN-EN 933-6:2014-07 Badania geometrycznych właściwości kruszyw – Część 6: Ocena właściwości powierzchni – Wskaźnik przepływu kruszyw.
- PN-EN 933-8:2001 Badania geometrycznych właściwości kruszyw – Część 8: Ocena zawartości drobnych cząstek. Badanie wskaźnika piaskowego.
- PN-EN 1097-6:2002; PN-EN 1097-6:2002/AC:2004; PN-EN 1097-6:2002:Ap1:2005 Badania mechanicznych i fizycznych właściwości kruszyw – Część 6: Oznaczanie gęstości ziarn i nasiąkliwości.
- PN-EN 1744-1:2010 Badania chemicznych właściwości kruszyw – Część 1: Analiza chemiczna.
- Dokumenty normalizacyjne i rozporządzenia**
- APROBATA TECHNICZNA IBDiM Nr AT/2007-03-1272 — Kruszywo ze zużytego ścierniwa żużlowego POLGRIT-IMN.
- APROBATA TECHNICZNA IBDiM Nr AT/2007-03-1272/1 — Kruszywo sztuczne z żużla pomiedziowego do niezwiązanych i związanych hydraulicznie materiałów do dróg „Kruszywo ze zużytego ścierniwa POLGRIT-IMN”.
- OST NAWIERZCHNIA Z BETONU CEMENTOWEGO, 2014 — Ogólne Specyfikacje Techniczne, rozdz. III, dział 06 Nawierzchnie betonowe. Internet: [https://www.gddkia.gov.pl/userfiles/articles/s/specyfikacja\\_13123/III\\_betonu/OST%20NAWIERZCHNIA%20Z%20BETONU%20CEMENTOWEGO%2015.07.2014.pdf](https://www.gddkia.gov.pl/userfiles/articles/s/specyfikacja_13123/III_betonu/OST%20NAWIERZCHNIA%20Z%20BETONU%20CEMENTOWEGO%2015.07.2014.pdf) (dostęp: maj 2017).
- RMŚ, 2009 — Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 28 stycznia 2009 r. zmieniające rozporządzenie w sprawie warunków, jakie należy spełnić przy wprowadzeniu ścieków do wód lub do ziemi, oraz w sprawie substancji szczególnie szkodliwych dla środowiska wodnego (DzU Nr 27 poz. 169).
- RRM, 2007 — Rozporządzenie Rady Ministrów z dnia 2 stycznia 2007 r. w sprawie wymagań dotyczących zawartości naturalnych izotopów promieniotwórczych potasu K-40, radu Ra-226 i toru Th-228 w surowcach i materiałach stosowanych w budynkach przeznaczonych na pobyt ludzi i inwentarza żywego, a także w odpadach przemysłowych stosowanych w budownictwie, oraz kontroli zawartości tych izotopów (DzU Nr 4 poz. 29).
- WT-1 2010 — Kruszywa do mieszanek mineralno-asfaltowych i powierzchniowych utrwaleń na drogach krajowych Wymagania techniczne.
- WT-1 2014 — Kruszywa do mieszanek mineralno-asfaltowych i powierzchniowych utrwaleń na drogach krajowych Wymagania techniczne.
- WT-4 2010 — Mieszanki niezwiązane do dróg krajowych. Wymagania techniczne.
- WT-5 2010 — Mieszanki związane spoiwem hydraulicznym do dróg krajowych. Wymagania techniczne.

## SUMMARY

The aggregates from granulated copper slag have been produced and used in Poland for decades.

Research conducted in the last century and described in this article confirms the need to use these aggregates in blends. Both the PN-EN standards for aggregates and standardization documents for aggregates do not cover the spe-

cific properties of practically any aggregate. Their specific properties are closely related to their application. The classification presented in terms of particle size, dust content, density, absorbability, and sand ratio confirms the specificity of this aggregate.