

## WYTRZYMAŁOŚĆ NA ŚCINANIE I NOŚNOŚĆ KRUSZYWA Z ŻUŻLI PALENISKOWYCH W ZALEŻNOŚCI OD WARUNKÓW WODNYCH

Eugeniusz Zawisza, Andrzej Gruchot

Uniwersytet Rolniczy w Krakowie

**Streszczenie.** Przedmiotem artykułu jest kruszywo z żużli paleniskowych MARDOBET o uziarnieniu 0–20 mm, produkowane przez Zakład Odzysku Surowców Madrohut Sp. z o.o. Celem badań było określenie wytrzymałości na ścinanie i wskaźnika nośności kruszywa w zależności od warunków wodnych, ponadto oznaczono pęcznienie liniowe przy różnym obciążeniu próbki. Badania wytrzymałości na ścinanie przeprowadzono w aparacie bezpośredniego ścinania, w skrzynce o przekroju  $10 \times 10$  i  $12 \times 12$  cm, z ramkami pośrednimi tworzącymi strefę ścinania o grubości 1,0 cm. Próbki formowano przy wilgotności optymalnej i wskaźniku zgęszczenia  $I_s = 0,97$ , a następnie ścinano bezpośrednio po uformowaniu oraz po 3-dobowym nasączeniu wodą. Wskaźnik nośności i pęcznienie liniowe oznaczano w cylindrze o objętości  $2,2 \text{ dm}^3$ . Wartości kąta tarcia wewnętrznego i spójności oraz wskaźnika nośności przy wilgotności optymalnej były stosunkowo wysokie. Nawodnienie spowodowało znaczne zmniejszenie spójności i wskaźnika nośności, przy czym były one nadal stosunkowo duże. Pęcznienie kruszywa było mniejsze od dopuszczalnego. Na podstawie uzyskanych wyników dokonano oceny możliwości wykorzystania badanego kruszywa do budowy nasypów drogowych.

**Słowa kluczowe:** odpady poenergetyczne, kruszywa, charakterystyka geotechniczna, parametry wytrzymałościowe, nośność

### WSTĘP

Produkcja energii elektrycznej i ciepłej w Polsce oparta jest głównie na termicznym przekształceniu węgla kamiennego lub brunatnego. Prowadzone w elektrowniach i elektrociepłowniach procesy spalania węgla powodują powstawanie dużych ilości odpadów poenergetycznych, między innymi popiołów lotnych, żużli, mieszanin popiołowo-żużlowych [Kucowski i in. 1994]. Odpady te w wyniku zastosowania odpowiednich techno-

---

Adres do korespondencji – Corresponding Authors: dr hab. inż. Eugeniusz Zawisza, prof. UR, dr hab. inż. Andrzej Gruchot, Katedra Inżynierii Wodnej i Geotechniki, Uniwersytet Rolniczy w Krakowie, al. Mickiewicza 24-28, 30-059 Kraków; e-mail: [kiwig@urk.edu.pl](mailto:kiwig@urk.edu.pl), [rmgrucho@cyf-kr.edu.pl](mailto:rmgrucho@cyf-kr.edu.pl).

© Copyright by Wydawnictwo Uniwersytetu Rolniczego w Krakowie, Kraków 2017

logii związanych z mechanicznym rozdziałem poszczególnych frakcji mogą stanowić materiał do produkcji tzw. kruszyw wtórnych [Kozioł i in. 2015].

Głównym czynnikiem decydującym o jakości odpadów energetycznych jest rodzaj spalanego węgla oraz współspalanych dodatków energonośnych (drewno i odpady z jego przeróbki, łupki bitumiczne, odpady z wydobycia, wzbogacania, koksowania i zgazowania węgla, biomasa) [Hyncar i Jarema-Suchorowska 2004]. Innym czynnikiem wpływającym na ilość, rodzaj i jakość, a co za tym idzie możliwości wykorzystania odpadów poenergetycznych w budownictwie są warunki spalania. Dlatego istotna jest właściwa ocena ich przydatności do celów budownictwa ziemnego [Pisarczyk 2004, Zawisza 2001, Zawisza i in. 2017].

Celem badań prezentowanych w niniejszej pracy było określenie wpływu warunków wodnych na wytrzymałość na ścinanie, nośności i pęcznienie kruszywa z żużli paleniskowych. Badania przeprowadzono pod kątem oceny przydatności tego kruszywa do budowy nasypów drogowych.

## MATERIAŁY I METODY

Materiał do badań pochodził ze składowiska opadów paleniskowych z huty ArcelorMittal Poland, zlokalizowanego w Płaszowie koło Krakowa – Nowej Huty. Próbkę do badań laboratoryjnych stanowiło kruszywo z żużli paleniskowych MADROBET o uziarnieniu 0–20 mm, produkowane przez Zakład Odzysku Surowców Madrohut Sp. z o.o. Zakres badań obejmował oznaczenie właściwości fizycznych, to jest uziarnienia, wilgotności optymalnej i maksymalnej gęstości objętościowej szkieletu oraz mechanicznych, to jest wytrzymałości na ścinanie i nośności.

Podstawowe właściwości fizyczne badanego materiału oznaczono metodami standardowymi [Myślińska 1998, Wiłun 2000]. Skład granulometryczny określono na podstawie oznaczeń metodą sitową w laboratorium TPA Sp. z o.o. [2015]. Wilgotność optymalną i maksymalną gęstość objętościową szkieletu oznaczono w aparacie Proctora, w cylindrze o objętości  $1,0 \text{ dm}^3$  ( $h = 10 \text{ cm}$ ,  $d = 11,2 \text{ cm}$ ), stosując standardową energię zagęszczenia  $E_z = 0,59 \text{ J} \cdot \text{cm}^{-3}$ .

Wartości parametrów charakteryzujących wytrzymałość na ścinanie, to jest kąta tarcia wewnętrznego i spójności, oznaczono w aparacie bezpośredniego ścinania w skrzynce o wymiarach w przekroju  $10 \times 10$  lub  $12 \times 12 \text{ cm}$ , z ramkami pośrednimi tworzącymi strefę ścinania o grubości  $1,0 \text{ cm}$ . Stosowanie ramek pośrednich umożliwia ścinanie strefowe, ograniczające wpływ zazębienia i klinowania się ziaren na wartość kohezji (tzw. kohezja pozorna). Próbkę formowano przy wilgotności optymalnej i wskaźniku zagęszczenia  $I_s = 0,97$ , następnie konsolidowano przy obciążeniu pionowym o wielkości 50, 100, 200, 300 i 400 kPa przez 30 minut (próbki o  $w = w_{opt}$ ) lub 15 minut (próbki po 3-dobowym nasączeniu wodą) i ścinano przy prędkości  $v = 0,25 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ :

- bezpośrednio po uformowaniu próbek – 2 badania,
- po 3-dobowym nasączeniu wodą – 2 badania.

Badania wskaźnika nośności wykonano w cylindrze o objętości  $2,2 \text{ dm}^3$  ( $h = 17,5 \text{ cm}$ ,  $d = 15 \text{ cm}$ ), zgodnie PN-S-02205:1998, przy penetracji próbki trzpieniem o powierzchni  $20 \text{ cm}^2$  do głębokości 2,5 i 5 cm. Większą z uzyskanych wartości przyjęto jako miarę

dajną wartość wskaźnika nośności. Próbki do badań wskaźnika nośności formowano przy wilgotności odpowiadającej 99% maksymalnej gęstości objętościowej szkieletu wyznaczonej z krzywej Proctora przy energii zagęszczania  $0,59 \text{ J} \cdot \text{cm}^{-3}$ . Próbki poddano nasączeniu w wodzie przez 4 doby bez obciążenia oraz przy obciążeniu siłą 22 oraz 44 N. W czasie nasączenia wodą rejestrowano przyrost wysokości próbek. Wartość pęcznienia liniowego określono jako stosunek przyrostu wysokości próbki do jej początkowej wysokości i wyrażono w procentach.

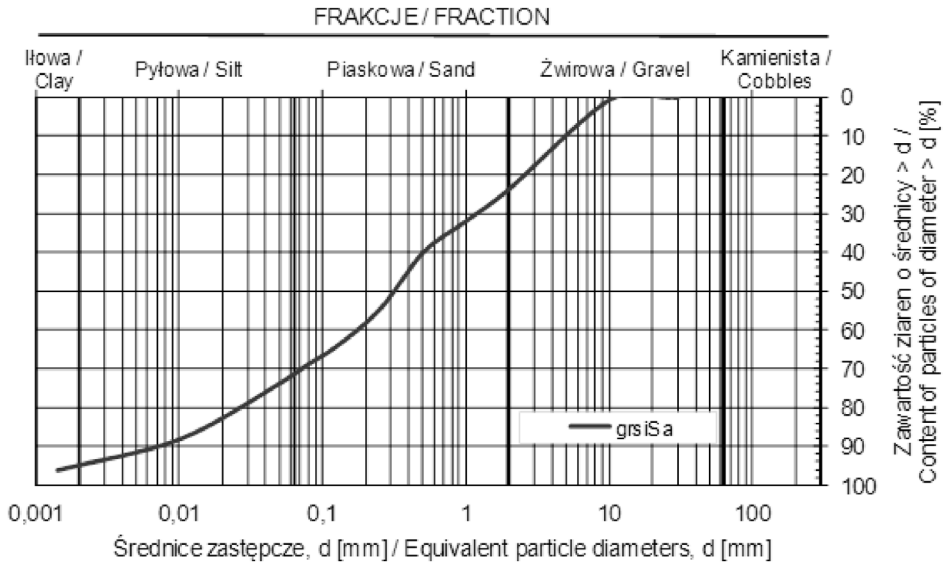
## WYNIKI BADAŃ

W składzie uziarnienia badanego materiału dominowały frakcje piaskowa i pyłowa o zawartości odpowiednio 48% i około 25%, zawartość frakcji żwirowej była stosunkowo duża – ponad 23%, natomiast frakcji ilowej było niedużo – 4%. Wskaźnik różnoziarnistości wynosił około 71 (tab. 1). Według klasyfikacji geotechnicznej [PN-EN ISO 14688-1,2:2006] badane kruszywo odpowiadało wielofrakcyjnym piaskom pylastym z dużą zawartością żwiru (ryc. 1). Wilgotność optymalna kruszywa wynosiła średnio 26%, a maksymalna gęstość objętościowa szkieletu  $1,47 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$  (ryc. 2).

Tabela 1. Podstawowe parametry geotechniczne kruszywa z żużli paleniskowych  
Table 1. Basic physical parameters of the ash-slag mixture aggregate

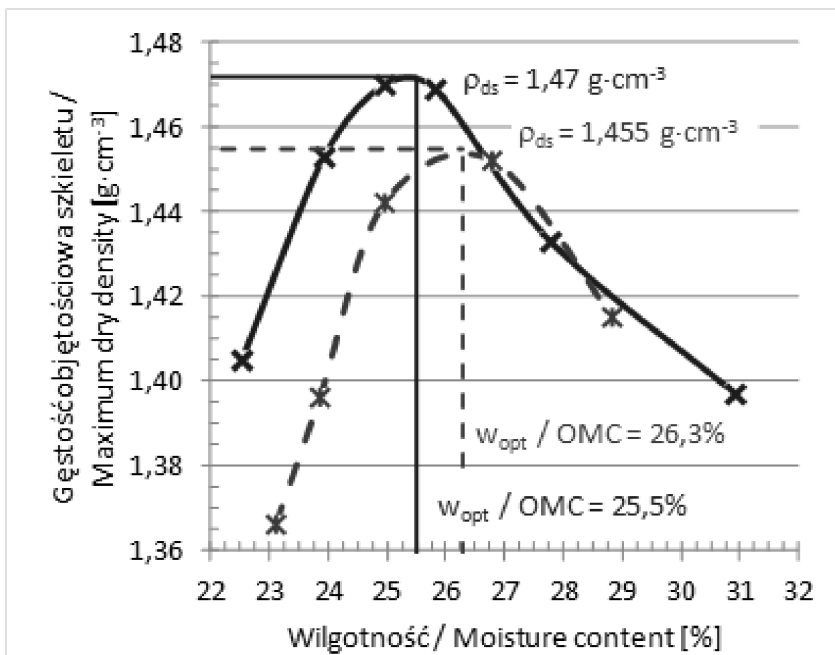
Parametr – Parameter	Wartość – Value
Zawartość frakcji – Fraction content, %:	
żwirowa – gravel, 2–63 mm	23,5
piaskowa – sand, 0,063–2 mm	48,0
pyłowa – silt, 0,002–0,063 mm	24,5
ilowa – clay, < 0,002 mm	4,0
Nazwa wg – Name acc. to PN-EN ISO 14688-2:2006	grsiSa
Wskaźnik różnoziarnistości – Uniformity coefficient, –	71,4
Wilgotność naturalna – Moisture content, %	27,0
Maksymalna gęstość objętościowa szkieletu Maximum dry density of solid particles, $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	1,46–1,47
Wilgotność optymalna – Optimum moisture content, %	25,5–26,3

Wyniki badania wytrzymałości na ścinanie zestawiono w tabeli 2. Wartości kąta tarcia wewnętrznego i spójności kruszywa z żużli paleniskowych przy zagęszczeniu  $I_G = 0,97$  wynosiły średnio:  $\phi = 33,9^\circ$ ,  $c = 30,4 \text{ kPa}$ . Są to wartości stosunkowo wysokie i świadczą o dużej wytrzymałości na ścinanie badanego materiału. Wartości tych parametrów po 3 dobach nasączenia próbek wodą wynosiły średnio:  $\phi = 35,8^\circ$ ,  $c = 12,0 \text{ kPa}$ . Wskazują one, że nawodnienie nie wpłynęło na wartość kąta tarcia wewnętrznego (była ona nawet nieco większa niż materiału nienawodnionego), natomiast wpłynęło znacznie na zmniejszenie spójności. Wpływ warunków badań (próbki nienawodnione i nawodnione) na wytrzymałość na ścinanie oraz wartości charakteryzujących ją parametrów zobrazowano na wykresach (ryc. 3).



Ryc. 1. Krzywa uziarnienia kruszywa z żużla paleniskowego

Fig 1. Grain size distribution curves of the ash-slag mixture aggregate

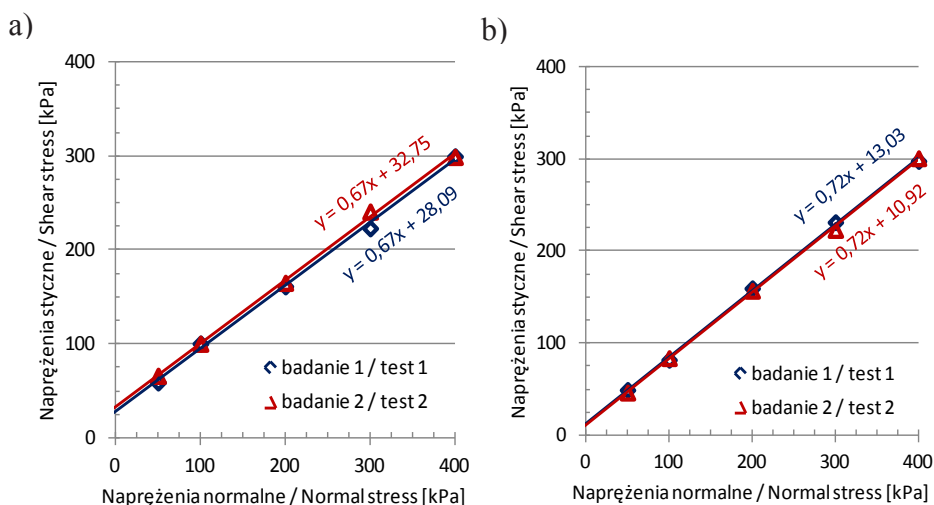


Ryc. 2. Krzywe zagęszczalności kruszywa z żużla paleniskowego

Fig. 2. Compaction curves of the tested ash-slag mixture aggregate

Tabela 2. Wyniki badań wytrzymałości na ścinanie kruszywa z żużla paleniskowego  
 Table 2. Test results of the shearing strength of the ash-slag mixture aggregate

Wytrzymałość na ścinanie próbek – Shear strength of the samples:					
nienawodnionych – unsaturated			nawodnionych – saturated		
Nr próbki No. of sample	Kat tarcia wewnętrznego Angle of internal friction		Nr próbki No. of sample	Kat tarcia wewnętrznego Angle of internal friction	
	$\phi, ^\circ$	Spójność Cohesion $c, \text{kPa}$		$\phi, ^\circ$	Spójność Cohesion $c, \text{kPa}$
ściananie bezpośrednio po uformowaniu próbek shearing directly after moulding of the samples			ściananie po 3 dobach nasączenia próbek wodą shearing of the samples after 3-day soaking in water		
1	33,8	28,1	1w	35,7	13,0
2	34,0	32,7	2w	35,8	10,9
średnia mean	33,9	30,4	średnia mean	35,75	12,0



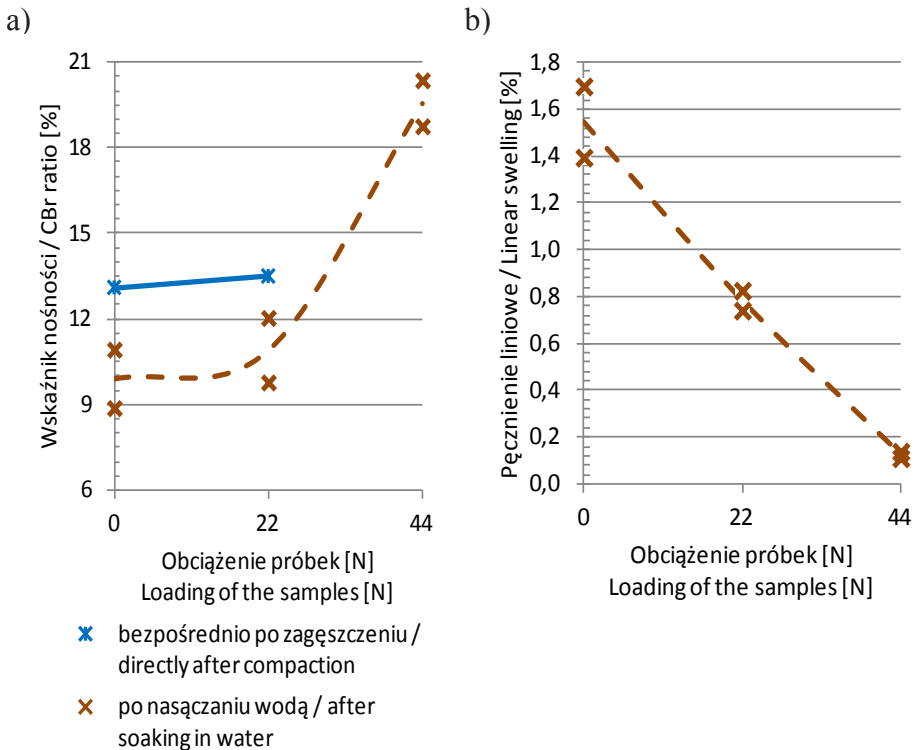
Ryc. 3. Zależność naprężeń stycznych od normalnych nienawodnionych (a) i nawodnionych (b) próbek żużla paleniskowego

Fig. 3. Shear stress versus normal stress for the unsaturated (a) and saturated (b) samples of the ash-slag mixture aggregate

Pęcznienie liniowe kruszywa po 4 dobach nasączenia wodą zależało od wielkości obciążenia próbki (tab. 3, ryc. 4b). Przy braku obciążenia próbek wartość pęcznienia wynosiła średnio 1,55%. Przy obciążeniu próbek siłą 22 N wartość pęcznienia liniowego wynosiła średnio 0,78%, a przy obciążeniu siłą 44 N – 0,13%. Uzyskane wartości pęcznienia wskazują na istotne zmniejszenie pęcznienia wskutek zwiększenia obciążenia, przy wzroście wilgotności w górnej części próbki średnio o około 1–2%.

Tabela 3. Wartości wskaźnika nośności i pęcznienia liniowego kruszywa z żużli paleniskowych  
 Table 3. Values of CBR ratio and linear swelling of the ash-slag mixture aggregate

Parametr – Parameter	Wartość – Value		
		dla próbki for the sample	średnia mean
Wskaźnik nośności – CBR ratio, %			
bezpośrednio po zagęszczeniu próbki przy obciążeniu siłą: directly after compaction of the sample at the load of:	0 N	13,1	13,1
	22 N	13,5	13,5
	44 N	–	–
po 4-dobowym nasączeniu wodą przy obciążeniu siłą: after 4 day soaking in water at the load:	0 N	8,9–10,9	9,9
	22 N	9,8–12,0	10,9
	44 N	20,4–18,8	19,6
Pęcznienie liniowe po 4-dobowym nasączeniu wodą przy obciążeniu siłą, %: Linear swelling after 4-day soaking in water at the load of, %:	0 N	1,394–1,698	1,546
	22 N	0,741–0,826	0,783
	44 N	0,111–0,139	0,125



Ryc. 4. Wpływ obciążenia na wskaźnik nośności (a) i pęcznienie liniowe (b) kruszywa z żużla paleniskowego

Fig. 4. Influence of loading on the CBR ratio (a) and linear swelling (b) of the ash-slag mixture aggregate

## ANALIZA PRZYDATNOŚCI BADANEGO KRUSZYWA DO BUDOWY NASYPÓW DROGOWYCH

Warunki określające przydatność gruntów naturalnych i antropogenicznych (będących ubocznymi produktami z przemysłu energetycznego i hutniczego) zostały określone w normie PN-S-02205:1998. Dotyczą one parametrów fizycznych materiału, takich jak uziarnienie, wysadzinowość, zagęszczalność, pęcznienie liniowe, zawartość części organicznych oraz mechanicznych, to jest kąta tarcia wewnętrznego i wskaźnika nośności. Pod względem składu uziarnienia badane kruszywo z żużli paleniskowych odpowiada piaskom drobnym pylastym z dużą domieszką żwiru. Zacytowana powyżej norma kwalifikuje takie materiały (grupa – popioły lotne i mieszaniny popiołowo-żuźlowe) jako przydatne do wbudowania w dolne warstwy nasypu poniżej strefy przemarzania, z zastrzeżeniem: gdy zalegają w miejscach suchych lub są izolowane od wody. Materiały takie można stosować również na górne warstwy nasypu w strefie przemarzania pod warunkiem ulepszenia ich spoiwami, np. cementem, wapnem lub popiołami aktywnymi. Wartości parametrów geotechnicznych badanego kruszywa z żużli paleniskowych oraz odnośnych normowych wartości kryterialnych zestawiono w tabeli 4.

Na podstawie przedstawionych wyżej wyników badań można stwierdzić, że kruszywo z żużli paleniskowych stanowi antropogeniczny grunt drobnoziarnisty na pograniczu gruboziarnistego [PN-EN ISO 14688-2:2006]. Stosunkowo duża wartość wskaźnika różnoziarnistości ( $C_u = 76,92$ ) świadczy, że był to materiał wielofrakcyjny, dlatego można przewidywać jego dobrą zagęszczalność przy wilgotności optymalnej. Wilgotność naturalna (27%) była zbliżona do optymalnej ( $w_{opt} = 26\%$ ), co pozwala wbudowywać materiał w nasyp bez dodatkowych zabiegów, np. dowilgacania lub przesuszania. Wartość maksymalnej gęstości objętościowej ( $\rho_{ds} = 1,47 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ) była znacznie większa od minimalnej wymaganej ( $\rho_{ds} \geq 1,0 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ). Wartość kąta tarcia wewnętrznego ( $\phi \cong 34^\circ$ ) była większa od minimalnej wymaganej ( $\phi \geq 20^\circ$ ). Również wartość spójności ( $c = 30,4$  i  $12 \text{ kPa}$  odpowiednio przy wilgotności optymalnej i po nawodnieniu) była stosunkowo duża. Podane wartości świadczą o dużej wytrzymałości na ścinanie. Wartość wskaźnika nośności po czterech dobach nasączania wodą przy obciążeniu siłą  $22 \text{ N}$  ( $w_{nos} = 10,9\%$ ) była nieznacznie większa od minimalnej wymaganej ( $w_{nos} \geq 10\%$ ), co wskazuje na dobrą nośność nasypu z tego materiału.

Wartość pęcznienia liniowego bez obciążenia próbki ( $p = 1,55\%$ ) była mniejsza od dopuszczalnej ( $p \leq 2\%$ ), ale przy obciążeniu siłą  $22 \text{ N}$  ( $p = 0,78\%$ ) była większa od dopuszczalnej ( $p \leq 0,5\%$ ). Z tego powodu, a także z uwagi na stosunkowo dużą zawartość cząstek drobnych ( $d < 0,075 \text{ mm} - 31\%$  i  $d < 0,02 \text{ mm} - 13,5\%$ ) badane kruszywo można dopuścić do wbudowania w dolne warstwy nasypu drogowego w miejscach suchych lub odizolowanych od wody.

Tabela 4. Wartości parametrów geotechnicznych kruszywa z żużli paleniskowych na tle wymagań normowych do nasypów drogowych  
 Table 4. Values of geotechnical parameters of the ash-slag mixture aggregate against standard requirements for road embankments

Parametr – Parameter	Wymagania normy Requirements of the standard PN-S-02205:1998	Kruszywo z żużli paleniskowych Ash-slag mixture aggregate
Uziarnienie – Granulation:		
zawartość frakcji piaskowo-żwirowej content of sand and gravel fraction	$\geq 35$	71,5
zawartość cząstek – content of particles $\leq 0,075$ mm	$\leq 75$	31,0
zawartość cząstek – content of particles $< 0,02$ mm	$< 3$	17,5
Wskaźnik różnoziarnistości Uniformity coefficient	$\geq 3$	71,4
Maksymalna gęstość objętościowa szkieletu Maximum dry density of solid particles $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	$\geq 1,0$	1,47
Pęcznienie liniowe przy obciążeniu siłą: Linear swelling at the load of :		
0 N	$\leq 2,0$	1,55
22 N	$\leq 0,5$	0,78
Kąt tarcia wewnętrzznego, ° Angle of internal friction, °	$\geq 20$	33,9
Wskaźnik nośności po 4 dobach nasączenia wodą przy obciążeniu siłą 22 N CBR ratio after 4-day soaking in water at the load of 22 N	$\geq 10$	10,9

## PODSUMOWANIE

Na podstawie przeprowadzonych badań laboratoryjnych oraz analizy ich wyników można stwierdzić, że kruszywo z żużli paleniskowych może stanowić materiał konstrukcyjny w budownictwie drogowym. Jako antropogeniczny grunt drobnoziarnisty na pograniczu gruboziarnistego charakteryzuje się ogólnie korzystnymi parametrami geotechnicznymi. Jest gruntem wielofrakcyjnym, o stosunkowo dużej wartości maksymalnej gęstości objętościowej szkieletu, a więc cechuje się dobrą zagęszczalnością. Przy wilgotności optymalnej i dużej wartości wskaźnika zagęszczenia ( $I_s = 0,97$ ) odznacza się dużą wytrzymałością na ścinanie i nośnością. Dlatego może być stosowany



do wznoszenia nasypów drogowych lecz na dolne warstwy poniżej strefy przemarzania, w miejscach suchych lub izolowanych od wody. Z uwagi na pochodzenie materiału ze składowiska odpadów paleniskowych, mogą występować różnice w partiach tego materiału pobieranego w różnym czasie i z różnych części składowiska, co może skutkować zróżnicowaniem ich parametrów geotechnicznych. Dlatego należy każdorazowo określić właściwości geotechniczne wybranej partii materiału, a technologię budowy nasypu, to jest głównie grubość warstw o określonej wilgotności, liczbę przejazdów maszyny zagęszczającej po jednym śladzie, powinno się określić w warunkach budowy na poligonie doświadczalnym.

## PIŚMIENNICTWO

- Hycnar, J., Jarema-Suchorowska, S. (2004). Nazewnictwo ubocznych produktów spalania. Materiały XI Międzynarodowej Konferencji „Popioły z energetyki”. Zakopane, 183–195.
- Koziół, W., Ciepłiński, A., Machniak, Ł., Borcz, A. (2015). Kruszywa w budownictwie. Cz. 2. Kruszywa alternatywne. Nowoczesne Budownictwo Inżynieryjne, 5(62), 35–39.
- Kucowski, J., Laudyn, D., Przekwas, M. (1994). Energetyka a ochrona środowiska. WNT, Warszawa.
- Myślińska, E. (1998). Laboratoryjne badania gruntów. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa.
- Pisarczyk, S. (2004). Grunty nasypowe. Właściwości geotechniczne i metody ich badania. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa.
- PN-EN ISO 14688-1:2006. Badania geotechniczne. Oznaczenie i klasyfikowanie gruntów. Część 1: Część 1: Oznaczenie i opis. Polski Komitet Normalizacyjny, Warszawa.
- PN-EN ISO 14688-2:2006. Badania geotechniczne. Oznaczenie i klasyfikowanie gruntów. Część 2: Zasady klasyfikowania. Polski Komitet Normalizacyjny, Warszawa.
- PN-S-02205:1998. Drogi samochodowe. Roboty ziemne. Wymagania i badania. Polski Komitet Normalizacyjny, Warszawa.
- Wiłun, Z. (2000). Zarzys geotechniki. Wydawnictwo Komunikacji i Łączności, Warszawa.
- Zawisza, E. (2001). Geotechniczne i środowiskowe aspekty uszczelniania grubookruchowych odpadów powęglowych popiołami lotnymi. Zesz. Nauk. AR w Krakowie, Rozprawy, 280, Wydawnictwo AR, Kraków.
- Zawisza, E., Biśtyga, J., Kopczyński, M. (2017). Wytrzymałość na ściskanie i mrozoodporność popioło-żużla stabilizowanego spoiwami hydraulicznymi. Acta Sci. Pol., Formatio Circumiectus, 16(1), 27–41.

## SHEAR STRENGTH AND BEARING CAPACITY OF THE ASH-SLAG MIXTURE AGGREGATE DEPENDING ON THE WATER CONDITIONS

**Abstract.** MARDOBET ash-slag mixture aggregate with the grain size of 0–20 mm, produced by the Raw Materials Recycling Plant Madrohut Sp. z o.o. [Ltd.]. The study aimed at the determination of the shear strength and bearing ratio of the aggregate depending on conditions, moreover, linear swelling was determined at different loadings of the sample. The shear strength tests were conducted in a direct shear apparatus in a box of 10 × 10 and 12 × 12 cm cross section with intermediate frames forming 1.0 cm thick shear zone. The samples were formed at the optimum moisture content and the degree of compaction  $I_s = 0,97$ , and then sheared directly after forming and after 3-day water-soaking. Bearing ratio and swelling were determined in a cylinder of a volume of 2.1 dm<sup>3</sup>.

The values of the angle of internal friction and cohesion and bearing ratio at the optimum moisture content were relatively high. Hydration caused a significant reduction in cohesion and bearing capacity, while they were still relatively high. The aggregate swelling was less than acceptable. Based on the obtained results, the possibility of using the aggregate to build road embankments was assessed.

**Keywords:** ash-slag mixture, aggregates, geotechnical characteristics, strength parameters, bearing capacity

*Zakceptowano do druku – Accepted for print: 15.11.2017*

Do cytowań – For citation: Zawisza, E., Gruchot, A. (2017). Wytrzymałość na ścinanie i nośność kruszywa z żużli paleniskowych w zależności od warunków wodnych. Acta. Sci. Pol., Formatio Circumiectus, 16(4), 5–12.