

Eugeniusz ZAWISZA, Grzegorz STAROWICZ

Zakład Mechaniki Gruntów i Budownictwa Ziarnego  
Akademia Rolnicza, Kraków

## WYTRZYMAŁOŚĆ NA ŚCINANIE ODPADÓW POHUTNICZYCH W ŚWIETLE BADAŃ W APARATACH BEZPOŚREDNIEGO ŚCINANIA

**Streszczenie.** Artykuł zawiera wyniki badań wytrzymałości na ścinanie kruszywa z żużła wielkopiecowego o uziarnieniu 0–10 i 0–31,5 mm. Kruszywo produkowane jest przez firmę Slag Recycling Sp. z o.o. z odpadów Huty Mittal Steel Poland – Oddział w Krakowie, zalegających na składowisku „Pleszów”. Do badań zastosowano standardowy oraz średniowymiarowy aparat do bezpośredniego ścinania gruntów o wymiarach skrzynki odpowiednio 12 x 12 x 7,8 cm i 30 x 30 x 20 cm. Wilgotność próbek była zbliżona do optymalnej dla danego kruszywa oraz o 5% mniejsza i o 2,5% większa od optymalnej, natomiast wskaźnik zagęszczenia wynosił 0,90; 0,95 i 1,00. W wyniku badań określono wpływ wilgotności, zagęszczenia oraz uziarnienia na wartości parametrów, charakteryzujących wytrzymałość na ścinanie kruszywa. Analiza wyników badań pozwoliła na dokonanie oceny przydatności kruszywa z żużła wielkopiecowego jako materiału konstrukcyjnego w budownictwie drogowym.

## SHEAR STRENGTH OF STEEL SLAG IN THE LIGHT OF TESTS USING DIRECT SHEAR APPARATUSES

**Summary.** The paper presents results of investigation of shear strength of furnace slag aggregate of granulation of 0–10 and 0–31.5 mm. The aggregate has been produced by Slag Recycling Sp. z o.o. from slag from steelworks Mittal Steel Poland – Kraków Subsidiary that are dumped in the dumping ground „Pleszów”. Standard and medium size direct shear apparatuses, with the box dimensions respectively 12 x 12 x 7.8 cm and 30 x 30 x 20 cm, were used for the tests. Moisture content of samples was close to the optimum one for the given aggregate as well as by 5% less and by 2.5% greater than optimum one, whereas compaction index was 0.90; 0.95 and 1.00. As a result of the tests, the influence of moisture content, compaction and the apparatus used on the values of parameters characterising the shear strength of aggregate was determined. The analysis of the tests results enabled made it possible to assess the usability of the furnace slag aggregate as a structural material in road structures.

## 1. Wprowadzenie i cel badań

Przy produkcji stali powstają odpady stałe, których ilość wynosi od 0,9 tony [6] do 1,3 tony [1] w przeliczeniu na 1 tonę stali, z czego na składowiska trafia około 0,35 tony [8]. Ilość nagromadzonych dotychczas na składowiskach odpadów pohutniczych, to jest żużła wielkopiecowego, stalowniczego i z metali nieżelaznych, można szacować na kilkadziesiąt milionów ton. Składowiska tych odpadów mogą stanowić potencjalny magazyn materiałów traktowanych jako antropogeniczne grunty budowlane. Po odpowiedniej przeróbce mogą one być wykorzystane do różnych celów inżynierskich, głównie w budownictwie ziemnym. Szczególnie duże możliwości wykorzystania odpadów pohutniczych stwarza budownictwo drogowe [2, 3], w którym istnieje ogromne zapotrzebowanie na materiały ziemne do formowania korpusów nasypów i na kruszywo do podbudów. Sprostanie temu zadaniu jest ważne z punktu widzenia zarówno techniczno-ekonomicznego, jak i ochrony złóż kruszyw naturalnych, których zasoby są ograniczone. Jest to aktualnie istotny problem w związku z realizacją praktycznie w całym kraju inwestycji drogowych, szczególnie autostrad.

Dla oceny przydatności odpadów pohutniczych do celów budownictwa drogowego niezbędne jest określenie ich parametrów geotechnicznych. Ze względu na to, że z odpadów pohutniczych wytwarzane są kruszywa o drobniejszym, a także grubszym uziarnieniu, badania ich parametrów mogą być prowadzone zarówno na aparaturze standardowej, jak i średnio - lub wielkowieściowej.

Celem badań prezentowanych w niniejszej pracy było określenie parametrów charakteryzujących wytrzymałość na ścinanie kruszywa z żużła wielkopiecowego o różnym uziarnieniu, w zależności od jego zagęszczenia i wilgotności.

## 2. Materiały i metodyka badań

Żużel wielkopiecowy pochodził ze składowiska „Pleszów” Huty Mittal Steel Poland SA – Oddział w Krakowie. Głównym składnikiem mineralnym żużła są krzemiany (95%), należące do dwóch rodzin wapniowo-magnezowych, tj. pirokrzemianów i ortokrzemianów. Skład chemiczny żużła zdominowany jest przez tlenki wapnia ( $\text{CaO}$  – 43%) i krzemu ( $\text{SiO}_2$  – 36%), udział pozostałych tlenków jest znacznie mniejszy ( $\text{MgO}$  – 7,2%,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  – 4%,  $\text{SO}_2$  1,2%,  $\text{Mn}_2\text{O}_5$  – 1,2%); w nieznaczących ilościach występują tlenki sodu, potasu i inne [10].

Z żuźla wielkopieczowego ze składowiska „Pleszów” firma Słag Recycling Sp. z o.o. wytwarza kruszywa hutnicze o różnych klasach ziarnowych [5, 7]. W niniejszej pracy przeprowadzono badania kruszywa o uziarnieniu 0–31,5 mm, przy czym wydzielono z niego również materiał drobniejszy o uziarnieniu mniejszym od 10 mm. Skład granulometryczny oznaczono metodą sitową z przemywaniem (na mokro). Parametry zagęszczalności oznaczono w aparatach: Proctora – standardowym produkcji Zakładu Aparatury Naukowej Uniwersytetu Jagiellońskiego w Krakowie, o objętości cylindra  $2,2 \text{ dm}^3$  i średnicy 150 mm w przypadku kruszywa o uziarnieniu  $< 10 \text{ mm}$ , oraz średniowymiarowym produkcji niemieckiej firmy Wille Geotechnik, o objętości cylindra  $9,8 \text{ dm}^3$  i średnicy 250 mm w przypadku kruszywa o uziarnieniu  $< 31,5 \text{ mm}$ . W obydwu aparatach stosowano standardową energię zagęszczania  $E_z = 0,59 \text{ J/cm}^3$ . Po zagęszczeniu obydwu materiałów oznaczono ich uziarnienie dla określenia zmian spowodowanych kruszeniem materiału (dezintegracja mechaniczna) podczas zagęszczania.

Badania parametrów wytrzymałościowych, tj. kąta tarcia wewnętrznego i spójności, przeprowadzono w aparatach bezpośredniego ścinania: standardowym typu AB2A produkcji ZAN UJ (skrzynka o wymiarach  $12 \times 12 \times 7,8 \text{ cm}$ , z ramkami pośrednimi tworzącymi strefę ścinania o grubości 1,0 cm) oraz średniowymiarowym produkcji angielskiej firmy Wykeham Farrance International (skrzynka o wymiarach  $30 \times 30 \times 20 \text{ cm}$ , z ramkami pośrednimi tworzącymi strefę ścinania o grubości 3,0 cm). Stosowanie ramek pośrednich umożliwia ścinanie strefowe, ograniczające wpływ zazębienia i klinowania się ziaren na wartość spójności (tzw. spójność pozorna [11]).

W standardowym aparacie bezpośredniego ścinania były wykonywane badania na kruszywie o uziarnieniu 0–10 mm przy trzech wartościach wilgotności, to jest 11,5, 16,5 ( $w_{\text{opt}}$ ) i 19%, przy czym przy każdej wilgotności wskaźniki zagęszczania próbek wynosiły:  $I_s = 0,90; 0,95 \text{ i } 1,00$ .

W średniowymiarowym aparacie bezpośredniego ścinania wykonywane były badania na kruszywie o uziarnieniu 0–31,5 mm przy jednakowej wilgotności, odpowiadającej optymalnej (13,2%) i przy trzech wskaźnikach zagęszczania próbek:  $I_s = 0,90; 0,95 \text{ i } 1,00$ .

Obydwa aparaty spełniają warunek wymagany w przypadku badań materiałów gruboziarnistych, wyrażony wzorem [8]:

$$\frac{D}{d_{\max}} \geq (4 - 6) \quad (1)$$

gdzie:

$D$  – bok lub średnica próbki,

$d_{\max}$  – średnica maksymalnego ziarna.

W przypadku aparatu standardowego wartość  $D/d_{\max}$  wynosi 12, natomiast w przypadku aparatu średniowymiarowego ponad 9.

Próbki były zagęszczane ręcznie w trzech warstwach bezpośrednio w skrzynkach aparatu (do osiągnięcia założonego wskaźnika zagęszczenia przy zadanej wilgotności), a następnie konsolidowane. W standardowym aparacie bezpośredniego ścinania czas konsolidacji próbek wynosił 30 minut przy obciążeniach równych 50, 100, 150, 200 i 250 kPa. W średniowymiarowym aparacie bezpośredniego ścinania czas konsolidacji wynosił 45 minut, przy obciążeniach równych 50, 110, 200, 300 i 400 kPa. Po konsolidacji próbki poddano ścinaniu, przy czym w obu aparatach zastosowano jednakową prędkość ścinania 1 mm/min. Jako kryterium ścięcia próbki przyjęto maksymalną wartość naprężenia ścinającego.

### 3. Wyniki badań

#### 3.1. Uziarnienie

Kruszywo o uziarnieniu  $< 10$  mm pod względem geotechnicznym odpowiada żwirom bardzo różnoziarnistym [9]; zawartość frakcji żwirowej wynosi około 52% (tab. 1). Zagęszczanie w aparacie Proctora spowodowało wyraźne rozdrobnienie materiału; zawartość frakcji żwirowej zmniejszyła się około 1,3-krotnie, natomiast frakcji piaskowej zwiększyła się około 1,2-krotnie, a frakcji pyłowej z iłową ponad 1,6-krotnie. Wartość wskaźnika różnoziarnistości zwiększyła się 1,15-krotnie, a więc materiał stał się bardziej różnoziarnisty.

Kruszywo o uziarnieniu  $< 31,5$  mm według klasyfikacji geotechnicznej odpowiada również bardzo różnoziarnistym żwirom; charakteryzuje się dominującym udziałem ziaren i okruszków odpowiadających frakcji żwirowej – ponad 74%. Zagęszczanie w aparacie Proctora nie spowodowało istotnej zmiany uziarnienia.

Przedstawione wyniki świadczą o pewnej podatności kruszywa na dezintegrację mechaniczną, przy czym jest ona nieznaczna w grubszym kruszywie, natomiast wyraźnie większa w kruszywie drobniejszym.

Tabela 1

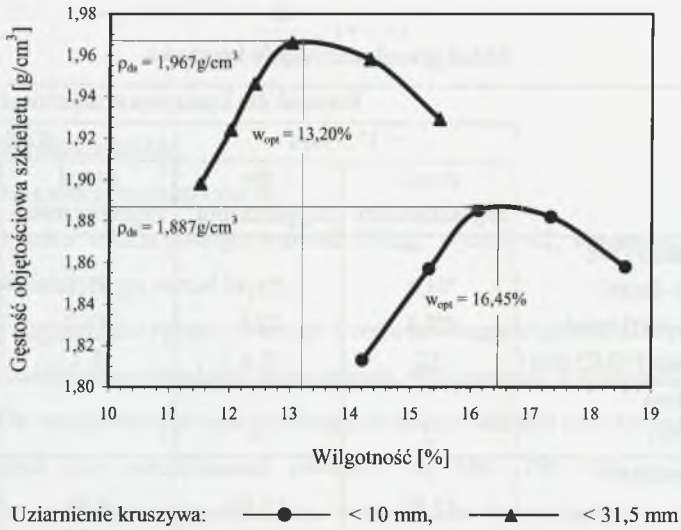
## Skład granulometryczny kruszywa

Parametr	Wartość dla kruszywa o uziarnieniu			
	< 31,5 mm		< 10 mm	
	przed zagęszczeniem	po zagęszczeniu*	przed zagęszczeniem	po zagęszczeniu*
Zawartość frakcji [%]:				
- żwirowa (40–2mm)	74,4	73,4	51,7	40,5
- piaskowa (2–0,05 mm)	22,4	22,8	43,2	51,2
- pyłowa i ilowa (<0,05 mm)	3,2	3,8	5,1	8,3
Zawartość ziaren < 0,075 mm [%]	2	2	7	10
Srednice miarodajne:				
- $d_{60}$ (mm)	12,50	12,50	3,20	2,10
- $d_{10}$ (mm)	0,30	0,26	0,14	0,08
Wskaźnik różnoziarnistości	41,7	48,1	22,9	26,3
Nazwa wg PN-86/B-02480	Z	Z	Z	Z

\* w aparacie Proctora

## 3.2. Zagęszczalność

Wilgotność optymalna kruszywa o uziarnieniu < 10 mm była około 1,3-krotnie większa od odpowiedniej wartości dla kruszywa o uziarnieniu < 31,5 mm (rys. 1). Maksymalna gęstość objętościowa szkieletu kruszywa o uziarnieniu < 10 mm była natomiast nieco mniejsza niż kruszywa grubszego (o  $d < 31,5$  mm). Może to świadczyć, że grubsze kruszywo zawiera więcej twardych okruchów krzemianowych o większej gęstości i dużej wytrzymałości, co może też wyjaśniać jego mniejszą podatność na dezintegrację mechaniczną.



Rys. 1. Krzywe zagęszczalności kruszywa o różnym uziarnieniu  
 Fig. 1. Compactibility curves for aggregates of different granulation

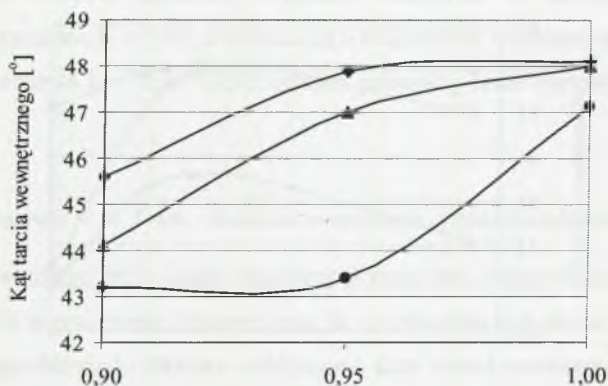
### 3.3. Wytrzymałość na ścinanie

#### *Kruszywa o uziarnieniu < 10 mm – badanie w aparacie standardowym*

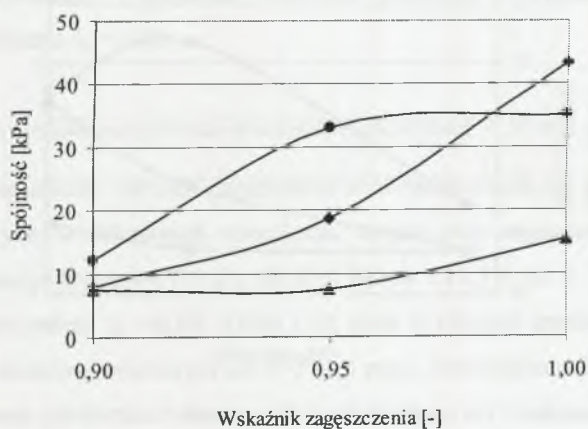
Zwiększanie wskaźnika zagęszczenia kruszywa od 0,90 do 1,00 powodowało zwiększanie kąta tarcia wewnętrznego o  $2^\circ$  przy wilgotności optymalnej (16,5%) oraz o  $4^\circ$  przy wilgotności mniejszej o 5% i większej o 2,5% od optymalnej (rys. 2a). W przypadku spójności odpowiednie zwiększanie wskaźnika zagęszczenia kruszywa powodowało znaczne jej zwiększanie – o 35 kPa przy wilgotności optymalnej, o 8 kPa przy wilgotności mniejszej o 5% od optymalnej i o 23 kPa przy wilgotności większej o 2,5% od optymalnej (rys. 2b).

Zwiększanie wilgotności kruszywa od 11,5 do 16,5% powodowało nieznaczne zwiększanie kąta tarcia wewnętrznego. Dalsze zwiększanie wilgotności do 19% spowodowało dość wyraźne zmniejszenie kąta tarcia wewnętrznego przy  $I_s = 0,90$  i  $0,95$  – odpowiednio o  $2,4^\circ$  i  $4,5^\circ$  oraz nieznaczne przy  $I_s = 1,00$  – o  $0,9^\circ$  (rys. 3a).

a)



b)



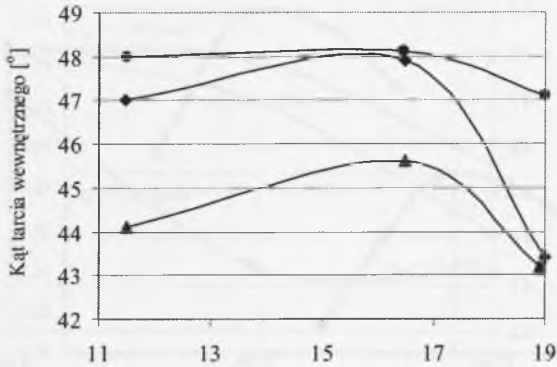
Wilgotność: —▲— 11,45%, —◆— 16,45%, —●— 18,95%

Rys. 2. Wpływ zagęszczenia na kąt tarcia wewnętrznego (a) i spójność (b) kruszywa o różnej wilgotności

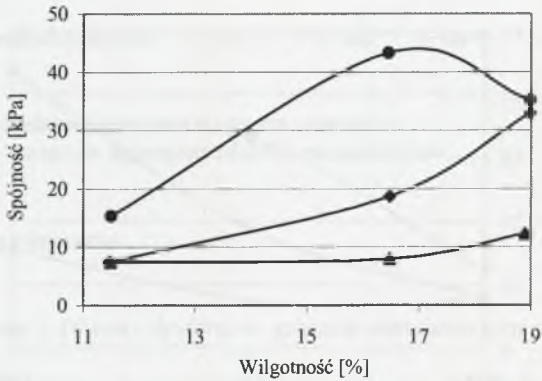
Fig. 2. Angle of internal friction (a) and cohesion (b) of aggregates of different moisture content versus compaction

W przypadku spójności zwiększanie wilgotności kruszywa od 11,5 do 16,5% powodowało również jej zwiększanie – nieznaczne przy  $I_s = 0,90$ , wyraźne przy  $I_s = 0,95$  – o ponad 11 kPa i znaczne przy  $I_s = 1,00$  – o 28 kPa. Dalsze zwiększanie wilgotności do 19% powodowało dalsze zwiększanie spójności przy  $I_s = 0,90$  i  $0,95$  – odpowiednio o ponad 4 i 12 kPa oraz zmniejszanie spójności przy  $I_s = 1,00$  – o ponad 8 kPa (rys. 3b).

a)



b)



Wskaźnik zagęszczenia :      —▲—  $I_s = 0,90$ ;      —◆—  $I_s = 0,95$ ;      —●—  $I_s = 1,00$

Rys. 3. Wpływ wilgotności na kąt tarcia wewnętrznego (a) i spójność (b) kruszywa o różnym zagęszczeniu

Fig. 3. Angle of internal friction (a) and cohesion (b) of aggregates of different compaction versus moisture content

Opierając się na przedstawionych powyżej wynikach, można stwierdzić, że przy każdym wskaźniku zagęszczenia największe wartości kąta tarcia wewnętrznego wykazywało kruszywo o wilgotności optymalnej (16,5%). Przy wilgotności kruszywa zarówno większej, jak i mniejszej od optymalnej wartości kąta tarcia wewnętrznego ulegały zmniejszeniu, przy czym najmniejsze jego wartości wykazywało kruszywo o największej wilgotności. Maksymalną wartość kąta tarcia wewnętrznego osiągnęło kruszywo o wilgotności optymalnej i wskaźniku zagęszczenia  $I_s = 1,00$ , a minimalną o wilgotności 19% i wskaźniku zagęszczenia  $I_s = 0,90$ ; różnica pomiędzy tymi wartościami wynosi około 5°.



Maksymalną wartość spójności wykazało kruszywo o wilgotności optymalnej i wskaźniku zagęszczenia  $I_s = 1,00$ , a minimalną o wilgotności mniejszej o  $5^\circ$  od optymalnej i wskaźniku zagęszczenia  $I_s = 0,90$  i  $0,95$ ; różnica pomiędzy tymi wartościami wynosi około 36 kPa.

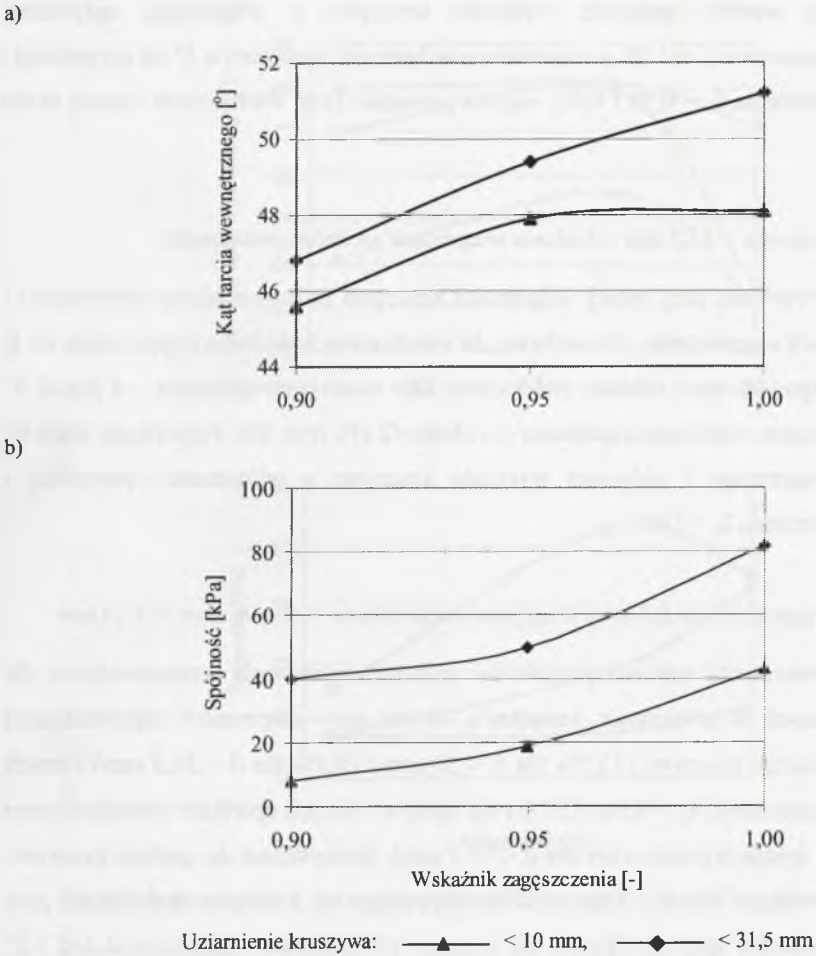
#### *Kruszywo o uziarnieniu < 31,5 mm – badania w aparacie średniowymiarowym*

Badania prowadzono przy jednej wilgotności kruszywa (odpowiadającej optymalnej) i trzech wskaźnikach zagęszczenia. Stwierdzono, że zwiększenie wskaźnika zagęszczenia od  $I_s = 0,90$  do  $1,00$  spowodowało nieduże zwiększenie kąta tarcia wewnętrznego – o ponad  $4^\circ$  (rys. 4a) oraz znaczne zwiększenie spójności – o około 42 kPa (rys. 4b). Największe wartości kąta tarcia wewnętrznego i spójności wykazało kruszywo o wilgotności optymalnej i wskaźniku zagęszczenia  $I_s = 1,00$ .

#### *Porównanie wytrzymałości na ścinanie kruszywa o uziarnieniu < 10 mm oraz < 31,5 mm*

Analizę porównawczą wartości parametrów wytrzymałościowych przeprowadzono dla materiałów badanych w zbliżonych warunkach, to jest przy wilgotności odpowiadającej optymalnej dla danego kruszywa (13,2% dla  $d < 10$  mm i 16,5% dla  $d < 31,5$  mm) i trzech wskaźnikach zagęszczenia;  $I_s = 0,90$ ;  $0,95$  i  $1,00$ , choć w różnych aparatach (standardowym dla  $d < 10$  mm i średniowymiarowym dla  $d < 31,5$  mm). Stwierdzono, że grubsze kruszywo wykazało nieco większe wartości kąta tarcia wewnętrznego niż kruszywo drobniejsze, przy czym różnice pomiędzy nimi zwiększały się wraz ze zwiększaniem zagęszczenia (od  $1,2^\circ$  przy  $I_s = 0,90$  do  $3,1^\circ$  przy  $I_s = 1,00$  – rys. 4a).

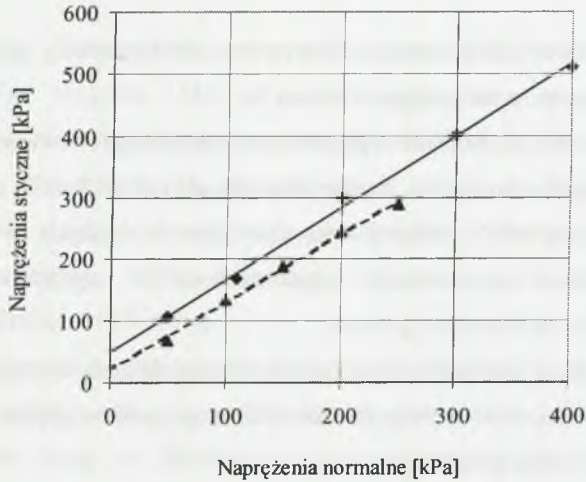
Kruszywo grubsze wykazało również większe wartości spójności niż kruszywo drobniejsze, różnice pomiędzy nimi były znaczne – 31–32 kPa przy  $I_s = 0,90$  i  $0,95$  i ponad 38 kPa przy  $I_s = 1,00$  (rys. 4b). Należy podkreślić, że otrzymane wartości spójności wynikają głównie z zazębienia i klinowania się okruchów, podobnie jak to występuje w gruboziarnistych gruntach mineralnych [11], natomiast w nieznacznym stopniu wynikają one z oddziaływania frakcji drobnych, tj. pyłowej z ilową, których zawartość w badanych materiałach była nieduża (3,2% w kruszywie  $< 10$  mm i 5,1% w kruszywie  $< 31,5$  mm).



Rys. 4. Wpływ zagęszczenia na kąt tarcia wewnętrzznego (a) i spójność (b) kruszywa o różnym uziarnieniu

Fig. 4. Angle of internal friction (a) and cohesion (b) of aggregates of different granulation versus compaction

Większe wartości parametrów wytrzymałościowych kruszywa grubszego wyrażają się większym oporem na ścinanie od oporu kruszywa drobniejszego, co ilustrują wykresy na rys. 5.



Uziarnienie kruszywa: — < 31,5 mm, - - - < 10 mm

Rys. 5. Zależność oporu na ścinanie od naprężeń normalnych dla kruszywa o różnym uziarnieniu  
 Fig. 5. Shear resistance versus normal strength for aggregates of different granulation

W aparacie średniowymiarowym bezpośredniego ścinania prowadzono wcześniej badania wytrzymałości na ścinanie kruszywa o uziarnieniu < 12,8 mm (produkowanego również z żużla ze składowiska „Pleszów”) [12], a także gruntu naturalnego – żwiru gliniastego [4]. Badania przeprowadzono przy wilgotności optymalnej (16% dla kruszywa i 8% dla żwiru gliniastego) i trzech wskaźników zagęszczenia ( $I_s = 0,90; 0,95$  i  $1,00$ ). Można stwierdzić, że wartości kąta tarcia wewnętrznego kruszywa o uziarnieniu < 31,5 mm były większe o 6–7° od wartości dla kruszywa o uziarnieniu < 12,8 mm (41–45° odpowiednio do  $I_s = 0,90–1,00$ ). Były one również większe o 9–10° od wartości dla żwiru gliniastego (37–43° odpowiednio do  $I_s = 0,90–1,00$ ).

Wartości spójności kruszywa o uziarnieniu < 31,5 mm były o około 20 kPa większe niż kruszywa o uziarnieniu < 12,8 mm (21 do 68 kPa odpowiednio do  $I_s = 0,90$  do  $1,00$ ) i o około 35 kPa większe niż żwiru gliniastego (10 do 44 kPa odpowiednio do  $I_s = 0,90$  do  $1,00$ ).

#### 4. Wnioski

Analiza wyników badań wytrzymałości na ścinanie kruszywa z żużła wielkopiecowego pozwala na wyciągnięcie następujących wniosków:

- 1) Kruszywa z żużła wielkopiecowego zarówno o uziarnieniu  $< 10$  mm, jak i  $< 31,5$  mm, są materiałami gruboziarnistymi, bardzo różnoziarnistymi (wskaźnik różnoziarnistości jest dużo większy od 15), o niedużej zawartości ziaren mniejszych od 0,075 mm (2–10%). Korzystniejszymi parametrami zagęszczalności i wytrzymałości na ścinanie charakteryzuje się kruszywo grubsze.
- 2) Kruszywa z żużła wielkopiecowego charakteryzują się dużą wytrzymałością na ścinanie, która jest większa od wytrzymałości zbliżonego pod względem uziarnienia gruntu naturalnego – żwiru gliniastego.
- 3) Zagęszczenie wpływa w większym stopniu na spójność, a w mniejszym na kąt tarcia wewnętrznego kruszywa. W przypadku kruszywa o uziarnieniu  $< 31,5$  mm zwiększenie wskaźnika zagęszczenia od  $I_s = 0,90$  do 1,00 powodowało ponaddwukrotne zwiększenie wartości spójności (od 40 do 81 kPa) oraz znacznie mniejsze zwiększenie wartości kąta tarcia wewnętrznego (od 47 do 51°).
- 4) Zwiększenie wilgotności o około 3% powyżej wilgotności optymalnej wpływa dość wyraźnie na zmniejszenie kąta tarcia wewnętrznego (o około 5°), natomiast nie powoduje zmniejszenia spójności.
- 5) Korzystne cechy uziarnienia, dobra zagęszczalność i duża wytrzymałość na ścinanie badanych kruszyw (większa niż zbliżonych pod względem uziarnienia gruntów mineralnych) świadczą, że są one wysoce przydatne do różnych zastosowań inżynierskich. Mogą one stanowić materiał budowlany do formowania korpusów nasypów i warstw konstrukcyjnych (podbudów) w drogownictwie, a także innych konstrukcji ziemnych. W celu uzyskania odpowiednich parametrów wytrzymałościowych, zapewniających stateczność i nośność konstrukcji ziemnej niezbędne jest zastosowanie odpowiedniej technologii budowy, polegającej na maksymalnym zagęszczeniu materiału w kolejnych warstwach przy wilgotności optymalnej.

**Literatura**

1. Adamczyk T.: Zastosowanie wybranych mineralnych surowców odpadowych w budownictwie wodnym. Mat. z narady nauk.-techn. nt.: Nowe materiały w budownictwie wodnym i ich zastosowanie, NOT-SITWM, Warszawa 1980.
2. Bulkowski L., Kowalewski M., Wusatowski R., Majza E.: Uzdatnianie odpadów hutnictwa żelaza i stali. Mat. z II Krajowej Konferencji Naukowej nt.: Teoretyczne i praktyczne problemy zagospodarowania odpadów hutniczych, Wydawnictwo Geologiczne, Kraków 1999, s. 1–8.
3. Grabowski Z., Łowkis A., Makowski J., Pisarczyk S.: Własności geotechniczne odpadów hutniczych z punktu widzenia możliwości ich zastosowania do budowy nasypów kolejowych. Mat. Symp. pt.: Składowanie i zagospodarowanie odpadów energetycznych i hutniczych, Częstochowa 1973, Wydawnictwo Geologiczne, Warszawa 1973, s. 73–82.
4. Gruchot A.T.: Badania parametrów wytrzymałościowych odpadów powęglowych (Wpływ metody badań). Rozprawa doktorska. Akademia Rolnicza, Kraków 2003 (niepublikowana).
5. Informator techniczny. Slag Recycling Sp. z o.o., Kraków 2003 (niepublikowany).
6. Kowalska-Jaskółowa K.: Odpady poprodukcyjne w hutnictwie żelaza i sposoby ich wykorzystania. Mat. Symp. pt.: Składowanie i zagospodarowanie odpadów energetycznych i hutniczych, Częstochowa 1973. Wydawnictwo Geologiczne, Warszawa 1973, 323–335.
7. Materiały konf. pt.: Ekologiczne kruszywa w budownictwie drogowym i hydrotechnicznym. Slag Recycling Sp. z o.o., Kraków 2005 (niepublikowane).
8. Pisarczyk S.: Grunty nasypowe. Właściwości geotechniczne i metody ich badania. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, 2004.
9. PN-86/B-02480. Grunty budowlane. Określenia, symbole, podział i opis gruntów.
10. Szczepańska J., Postawa A.: Ocena ekologiczna kruszywa z żużla wielkopieczowego. Zakład Hydrogeologii i Ochrony Wód, AGH, Kraków 2000 (niepublikowane).
11. Wiłun Z.: Zarys geotechniki. Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa 2000.
12. Zawisza E., Biernat M.: Wytrzymałość na ścinanie kruszywa z żużla wielkopieczowego. „Drogownictwo” 2007, nr 2, s. 48–51.