

## OPORY TARCIA NA KONTAKCIE MIESZANINA POPIOŁOWO-ŻUŻŁOWA A GEOWŁÓKNINA

## FRICITIONAL RESISTANCE ON THE CONTACT OF ASH-SLAG MIXTURE AND GEOTEXTILE

Andrzej Gruchot

Uniwersytet Rolniczy w Krakowie

**Streszczenie.** W pracy przedstawiono wyniki badań wytrzymałości na ścinanie mieszanki popiołowo-żużłowej z Elektrowni Skawina oraz oporów tarcia międzyfazowego na kontakcie mieszanki – geowłóknina Secutex 401-GRK 5C. Badania przeprowadzono przy trzech wartościach wskaźnika zagęszczenia tj.  $I_s = 0,90, 0,95$  i  $1,00$  oraz wilgotności zbliżonej do optymalnej.

Stwierdzono wysokie wartości kąta tarcia wewnętrznego i spójności mieszanki popiołowo-żużłowej oraz kąta tarcia międzyfazowego i adhezji na kontakcie mieszanki – geowłóknina wyraźnie zależne od zagęszczenia. Potwierdza to przydatność przedmiotowej mieszanki do celów budownictwa ziemnego jako materiału samodzielnego, jak również w układzie z geowłókniną.

**Abstract.** The paper presents results of the shear strength tests carried out on the ash-slag mixture from Skawina Power Plant as well as the results of interphase frictional resistance tests on the contact of the mixture and nonwoven geotextile Secutex GRK 401-5C. Tests were performed at three values of compaction indexes, such as  $I_s = 0.90, 0.95$  and  $1.00$  and at the moisture content close to optimal.

There were high values of the angle of internal friction and cohesion of the ash-slag mixture and the interfacial friction angle and adhesion on the contact of the mixture and nonwoven geotextile, which distinctly depended on the compaction. This confirms the usability of the mixture for earthworks purposes as a separate material as well as in the system with nonwoven geotextiles.

**Słowa kluczowe:** mieszanka popiołowo-żużłowa, geowłóknina, wytrzymałość na ścinanie, opór tarcia międzyfazowego, współczynnik tarcia

**Key words:** ash-slag mixture, nonwoven geotextiles, shear strength, interphase friction resistance, coefficient of friction

## WSTĘP

Konstrukcje z gruntu zbrojonego są znane i wykonywane od czasów starożytnych. Współcześnie zbrojenie gruntów zapoczątkował w 1963 roku we Francji Henri Vidal – opatentował on zbrojenie gruntu poziomymi cięgnami metalowymi, których zadaniem było przenoszenie sił rozciągających [Sawicki i Leśniewska 1993]. Do szybkiego wzrostu popularności tego systemu przyczyniła się niezawodność, konkurencyjna cena, a także różnorodność obszarów jego zastosowania.

Zbrojenie gruntu polega na wprowadzaniu do niego bądź umieszczeniu w nim w regularny sposób elementów wykonanych z innego materiału o odpowiedniej przyczepności, wytrzymałości i trwałości. Grunt zbrojony stanowi połączenie dwóch materiałów, które są ze sobą związane dzięki występowaniu między nimi odpowiednio dużych sił tarcia. Stosując zbrojenie, wytwarza się kompozyt, cechujący się wytrzymałością na rozciąganie, której sam grunt praktycznie nie wykazuje. Początkowo jako zbrojenia używano taśm metalowych wykonanych ze stali. Obecnie grunty zbroi się także geosyntetykami (geotkaniny, geowłókniny, geosiatki), wykonuje się też zbrojenia szkieletowe i prętowe. Do wypełnienia konstrukcji najczęściej używane są grunty niespoiste o dużym kącie tarcia wewnętrznego zapewniające dobrą współpracę ze zbrojeniem.

Materiałem, który może być również wykorzystywany jako zasyпка w nasypach z gruntu zbrojonego, są odpady przemysłowe stanowiące produkty uboczne powstające w wyniku wydobywania węgla kamiennego lub jego spalania. Zgodnie z dyrektywami Unii Europejskiej w Polsce prowadzone są działania zmierzające do ograniczenia ilości odpadów wytwarzanych w procesach technologicznych lub ich zagospodarowania. Badania dotyczące wykorzystania odpadów przemysłowych potwierdziły ich przydatność w budownictwie ziemnym, w szczególności zaś w budownictwie drogowym – pełnią one tam funkcję substytutu kruszyw naturalnych. Według Skarżyńskiej [1997] kruszywa sztuczne, powstające między innymi z odpadów przemysłowych, mają szereg zastosowań, które można ująć w następujące grupy:

- materiał budowlany w budownictwie komunikacyjnym, hydrotechnicznym i górnictwie,
- do rekonstrukcji i rekultywacji terenów zdegradowanych (wyrębiska i zapadliska terenu, zwałowiska odpadów powęglowych, składowiska odpadów komunalnych),
- surowiec do produkcji materiałów budowlanych, odzysku surowców i minerałów.

Możliwości i warunki stosowania odpadów przemysłowych w budownictwie drogowym zostały określone w normie PN-S-02205:1998.

Geosyntetyki w konstrukcjach inżynierskich stosowane są od lat 50. ubiegłego wieku. Obecnie w coraz większej liczbie projektów wykorzystywane jest zbrojenie geosyntetyczne. Poza ścianami oporowymi i przyczółkami wykonuje się również nasypy na słabym podłożu ze zbrojeniem geosyntetycznym w podstawie. W budownictwie drogowym efektem zastosowania geosyntetyków jest korzystna zmiana rozkładu naprężeń powstających w gruncie podłoża i korpusie drogi w wyniku oddziaływań zewnętrznych. Zmiany te wynikają ze wzmocnienia warstw gruntowych i ich separacji przed wzajemnym przenikaniem ziaren gruntu, powodującym osłabienie podłoża drogi [Bugajski i Grabowski 1999].

Jednym z największych obiektów w Polsce zrealizowanym z gruntu zbrojonego jest nasyp drogowy na drodze wojewódzkiej nr 933 w Jastrzębiu Zdroju [Ajdukiewicz 2003]. Geosyntetyki zastosowano również do budowy węzła autostradowego Sośnica, który łączy autostradę A4 z autostradą A1 w Gliwicach, oraz na innych obiektach komunikacyjnych na Śląsku, gdzie występują zagrożenia szkodami górnictwami. Oprócz geosiatek szeroko w Polsce stosowane są też konstrukcje z gruntu zbrojonego geotkaninami. Są to głównie nasypy na słabych gruntach ze zbrojeniem w podstawie.

Technologia gruntu zbrojonego jest coraz częściej alternatywą dla tradycyjnych żelbetowych konstrukcji. Również Polskie doświadczenia potwierdzają tę tendencję. Ograniczenia w możliwościach zastosowania wynikają w dużej mierze z braku jednoznacznych i równocześnie poprawnych przepisów i wytycznych służących projektowaniu i stosowaniu geosyntetyków w różnych aplikacjach inżynierskich w Polsce [Kawalec i Gołos 2007]. Powoduje to duże rozbieżności w kwestii potrzebnej wytrzymałości zbrojenia i prowadzi do drastycznych różnic w specyfikacjach technicznych, a także budzi nieufność zarówno u inwestorów, jak i projektantów [Sobolewski 2006].

Podstawowym czynnikiem, który decyduje o właściwym współdziałaniu gruntu i zbrojenia, a przez to wpływa na stateczność konstrukcji zbudowanej z gruntu zbrojonego, jest współczynnik tarcia międzyfazowego  $\mu$ . Współczynnik ten przy uwzględnieniu występowania adhezji na kontakcie zbrojenie – grunt zasypki można wyznaczyć z poniższej zależności [Bauazza i Wei 1993]:

$$\mu = \frac{c_a}{\sigma_n} + \operatorname{tg}\phi_a \quad (1)$$

gdzie:

- $c_a$  – adhezja, kPa,
- $\sigma_n$  – naprężenia normalne, kPa,
- $\phi_a$  – kąt tarcia międzyfazowego, °.

Leśniewska i Kulczykowski [2001], jak również wytyczne ITB [Wysokiński i Kotlicki 2008] podają, że na etapie ustalania minimalnej długości zbrojenia lub przy braku wyżej wymienionych badań, do obliczeń wartość tego współczynnika można szacunkowo przyjąć na podstawie kąta tarcia wewnętrznego gruntu zasypki ( $\phi$ ):

$$\mu = 0,5 \cdot \operatorname{tg}\phi \quad (2)$$

Porównując obydwa powyższe równania, należy zwrócić uwagę, że równanie (1) uwzględnia zarówno wpływ adhezji, jak i wartość obciążenia pionowego, w tym przypadku naprężeń normalnych. Dlatego można się spodziewać, że długość zbrojenia będzie znacznie mniejsza niż uzyskana na podstawie równania (2).

Wartość współczynnika powinna być jednak wyznaczona doświadczalnie dla każdego rodzaju zbrojenia. Podstawowe badanie pozwalające określić opór tarcia międzyfazowego na kontakcie zbrojenie – grunt zasypki przeprowadza się w aparacie bezpośredniego

ścinania. Badanie to wykonuje się analogicznie do badania wytrzymałości na ścinanie, a analizę wyników opiera się o równanie Coulomba:

$$\tau_{fa} = \sigma_n \cdot \operatorname{tg}\phi_a + c_a \quad (3)$$

gdzie:

$\tau_{fa}$  – opór tarcia międzyfazowego, kPa,

$\sigma_n$  – naprężenia normalne, kPa,

$\phi_a$  – kąt tarcia międzyfazowego, °,

$c_a$  – adhezja, kPa.

Inną metodą wyznaczania współczynnika tarcia międzyfazowego jest test wyciągania (*pull out test*) elementu zbrojenia umieszczonego w gruncie. Metoda polega na pomiarze siły niezbędnej do wyciągnięcia zbrojenia.

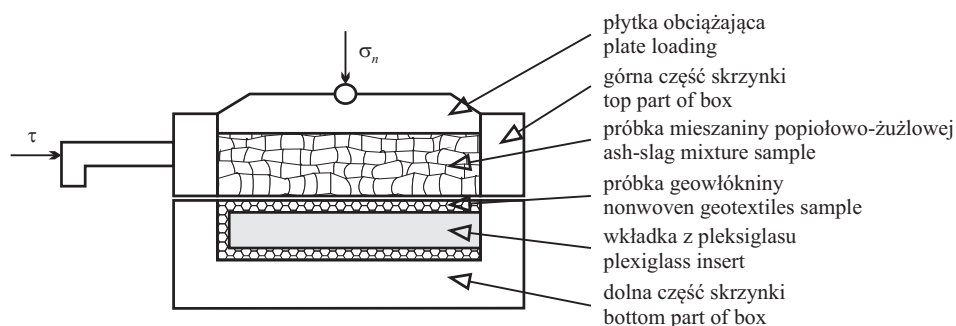
## CEL I ZAKRES PRACY

Celem pracy było określenie wpływu zagęszczenia na wytrzymałość na ścinanie mieszaniny popiołowo-żuźlowej i oporów tarcia międzyfazowego na kontakcie mieszanina – geosyntetyk. Badania zostały wykonane z wykorzystaniem mieszaniny popiołowo-żuźlowej pobranej ze składowiska Elektrowni Skawina oraz geowłokny Secutex 401-GRK 5C.

Podstawowe właściwości fizyczne oraz parametry zagęszczalności oznaczono metodami standardowymi. Skład uziarnienia określono metodą sitową (dla  $d \geq 0,063$  mm) oraz areometryczną (dla  $d < 0,063$  mm), a gęstość właściwą szkieletu – metodą kolby miarowej w wodzie destylowanej. Wilgotność optymalną i maksymalną gęstość objętościową szkieletu oznaczono w aparacie Proctora w cylindrze o objętości  $2,2 \text{ dm}^3$  przy energii zagęszczania  $0,59 \text{ J} \cdot \text{cm}^{-3}$ .

Badania wytrzymałości na ścinanie i oporów tarcia międzyfazowego przeprowadzono w aparacie bezpośredniego ścinania w skrzynce o wymiarach  $120 \times 120$  mm. Do badań wykorzystano materiał o uziarnieniu poniżej 10 mm. Próbkę formowano bezpośrednio w skrzynce aparatu przy wilgotności zbliżonej do optymalnej (tab. 1) i trzech wartościach wskaźnika zagęszczenia, tj.  $I_s = 0,90, 0,95$  i  $1,00$ . Wysokość próbki w badaniach wytrzymałości na ścinanie wynosiła 7,7 cm. W badaniach oporów tarcia międzyfazowego dolną część skrzynki wypełniono wkładką z pleksiglasu, na której umieszczono próbkę geosyntetyku (ryc. 1). Bezpośrednio na geosyntetyku formowano próbkę z mieszaniny popiołowo-żuźlowej o wysokości 2,9 cm.

Próbki poddano obciążeniu o wielkości 50, 100, 200, 300 i 400 kPa, a następnie ścinano przy prędkości  $1,0 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$  do uzyskania 10% odkształcenia poziomego próbki. Jako kryterium ściecia przyjęto maksymalną wartość naprężeń ścinających ( $\max \tau$ ). Obliczenia parametrów wytrzymałości na ścinanie i oporów tarcia wykonano metodą najmniejszych kwadratów zgodnie z PN-B-04481:1988.



Ryc. 1. Schemat skrzynki aparatu bezpośredniego ścinania przystosowanego do badań oporów tarcia międzyfazowego

Fig. 1. Diagram of the box from the shear strength apparatus adapted to the interphase friction resistance testing

## CHARAKTERYSTYKA GEOSYNTETYKU

Do badań oporów tarcia międzyfazowego użyto geowłókninę Secutex 401-GRK 5C. Geosyntetyki Secutex cechuje duża rozciągliwość i odporność na przebicie oraz wysoka wodoprzepuszczalność. Secutex GRK jest cienką, nietkaną, igłowaną geowłókniną wykonaną z włókien polipropylenowych, dlatego jest odporna na butwienie, zawilgoceenie i związki chemiczne [Maro 2010].

Ze względu na swoją grubość Secutex gwarantuje odpowiednią ochronę jako warstwa ochronna. Mechaniczne wzmocnienia oraz wysoka rozciągliwość, odporność na ścieranie, gwarantują skuteczną ochronę, w szczególności w obciążeniach dynamicznych. W tabeli 1 przedstawiono podstawowe parametry techniczne geosyntetyku Secutex.

Geowłókniny z serii Secutex znajdują zastosowanie w budownictwie wodnym, budowie składowisk odpadów, dróg i tuneli. Można je również wykorzystywać jako filtry w instalacjach odwadniających, zapobiegające przepływowi cząstek podłoża [Maro 2010].

Tabela 1. Parametry techniczne geowłókniny Secutex 401-GRK 5C [Naue b.d.]

Table 1. Technical characteristics of nonwoven geotextiles Secutex 401-GRK 5C [Naue b.d.]

Lp. No.	Parametr – Parameters	Wartość – Value
1	Gramatura – Mass per unit area	400 g · m <sup>-2</sup>
2	Grubość – Thickness	3,3 mm
3	Wytrzymałość na rozciąganie: kierunek podłużny/kierunek poprzeczny Tensile strength: machine direction/cross machine direction	18,0/25,0 kN · m <sup>-1</sup>
4	Wydłużenie przy max rozciągnięciu: kierunek podłużny/poprzeczny Extension at maximum tension: machine direction/cross machine direction	60/40%

Tabela 1. cd.  
Table 1. cont.

Lp. No.	Parametr – Parameters	Wartość – Value
5	Przebiecie statyczne – Puncture force	4000 N
6	Wydłużenie przy przebiciu statycznym Displacement at static puncture strength	35%
7	Efektywna wielkość porów – Characteristic opening size	0,08 mm
8	Przepuszczalność wodna przy obciążeniu 2 kPa Water flow rate in the plane at 2 kPa w kierunku pionowym – in vertical direct $k_v$ w kierunku poziomym – in horizontal direct $k_h$	$1,0 \times 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ $1,0 \times 10^{-2} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

## WYNIKI BADAŃ I ICH ANALIZA

### Właściwości fizyczne

Pod względem geotechnicznym mieszanina popiołowo-żuźłowa odpowiadała kilkufrakcyjnym piaskom pylastym (siSa) [PN-EN ISO 14688:2006]. W składzie uziarnienia przeważała frakcja piaskowa, której średnia zawartość przekraczała 68%. Średnia zawartość frakcji żwirowej wynosiła około 16%, pyłowej 15%, a ilowej poniżej 1% (tab. 2) [Gruchot i Resiuła 2011].

Gęstość właściwa szkieletu wynosiła średnio  $2,48 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ . Maksymalna gęstość objętościowa szkieletu wynosiła średnio  $1,26 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$  przy wilgotności optymalnej około 31%.

Tabela 2. Charakterystyka geotechniczna mieszaniny popiołowo-żuźłowej [Gruchot i Resiuła 2011]  
Table 2. Geotechnical characteristic of the ash-slag mixture [Gruchot i Resiuła 2011]

Lp. No.	Parametr – Parameter	Wartość – Value
1	Zawartość frakcji – Fraction content, %:	
	żwirowa – gravel, Gr: $63 \div 2 \text{ mm}$	15,9
	piaskowa – sand, Sa: $2 \div 0,063 \text{ mm}$	68,4
	pyłowa – silt, Si: $0,063 \div 0,002 \text{ mm}$	15,1
	ilowa – clay, Cl: $< 0,002 \text{ mm}$	0,6
2	Nazwa wg [PN-EN ISO 14688:2006] Soil name acc. to [PN-EN ISO 14688:2006]	siSa Piasek pylasty Silty sand
3	Wskaźnik jednorodności uziarnienia – Uniformity coefficient, $C_U$	7,5
4	Gęstość właściwa szkieletu – Specific gravity, $\rho_s, \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$	2,48
5	Wilgotność optymalna – Optimum moisture content, $w_{opt}, \%$	30,6
6	Maksymalna gęstość objętościowa szkieletu Maximum dry density, $\rho_{ds}, \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$	1,263

### Wytrzymałość na ścinanie

Wpływ zagęszczenia na wartości kąta tarcia wewnętrznego i spójności zaznaczył się wyraźnie (tab. 3). Zwiększenie kąta tarcia wewnętrznego wyniosło od około 35 do ponad 42° (ryc. 2), a wartości spójności zwiększyły się od około 20 kPa do 26 kPa – wraz ze wzrostem wskaźnika zagęszczenia od  $I_s = 0,90$  do  $I_s = 1,00$ .

Tabela 3. Wartości parametrów charakteryzujących wytrzymałość na ścinanie mieszaniny popiołowo-żużłowej i opór tarcia międzyfazowego

Table 3. Values of shear strength parameters of ash-slag mixture and interphase friction resistance parameters

Wskaźnik zagęszczenia Compaction index $I_s$	Mieszanina popiołowo-żużłowa Ash-slag mixture				Układ: mieszanina – geowłóknina System: ash-slag mixture – nonwoven geotextiles			
	Kąt tarcia wewnętrznego* Angle of internal friction*		Spójność* Cohesion*		Kąt tarcia międzyfazowego Interphase friction angle		Adhezja Adhesion	
	$\phi$	$\phi_{sr}$	$c$	$c_{sr}$	$\phi_a$	$\phi_{a sr}$	$c_a$	$c_{a sr}$
	°		kPa		°		kPa	
0,90	35,7	35,2	18,6	19,9	33,4	33,5	24,4	22,6
	34,7		21,2		33,6		20,8	
0,95	40,0	38,5	19,8	23,3	34,5	35,1	23,8	24,2
	36,9		26,7		35,6		24,6	
1,00	42,2	42,5	23,0	26,0	37,0	37,8	27,8	26,5
	42,8		28,9		38,6		25,1	

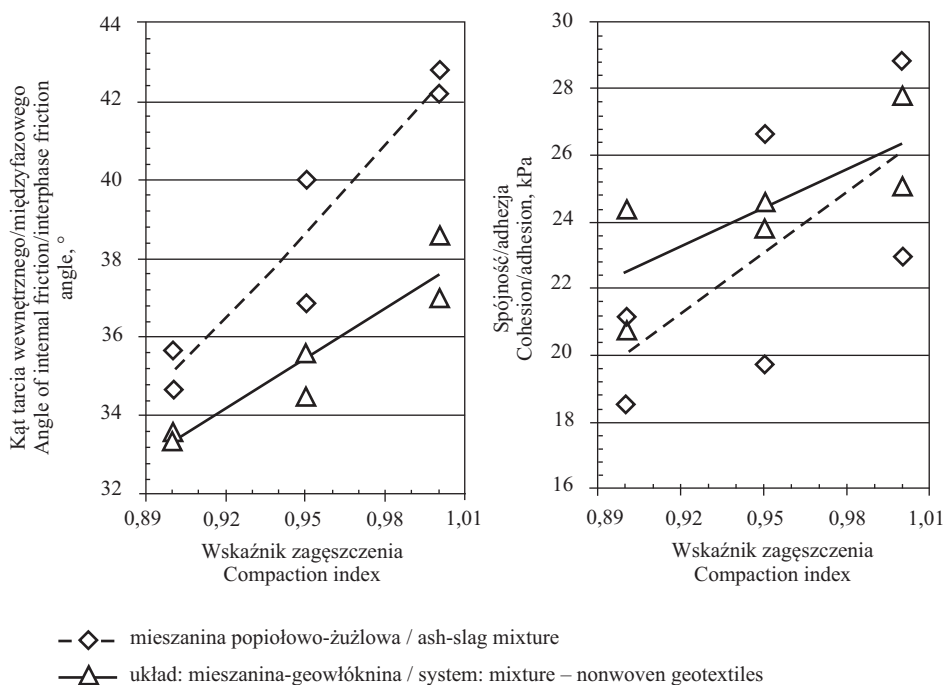
\* za Gruchot i Resiula 2011 – according to Gruchot and Resiula 2011

### Opór tarcia międzyfazowego

Wzrost wskaźnika zagęszczenia od  $I_s = 0,90$  do  $I_s = 1,00$  spowodował zwiększenie kąta tarcia międzyfazowego od ponad 33 do blisko 38° (ryc. 2), natomiast wartość adhezji zwiększyła się od blisko 23 do ponad 26 kPa.

### Porównanie wyników

Analizując uzyskane wyniki badań, stwierdzono wpływ zagęszczenia na uzyskane wartości kąta tarcia wewnętrznego i spójności mieszaniny popiołowo-żużłowej oraz kąta tarcia międzyfazowego i adhezji na kontakcie układu mieszanina popiołowo-żużłowa a geosyntetyk (tab. 3). W przypadku kąta tarcia wewnętrznego i międzyfazowego było to zwiększenie odpowiednio o około 7 i 4° wraz ze wzrostem wskaźnika zagęszczenia od  $I_s = 0,90$  do  $I_s = 1,00$ . Natomiast wartości spójności wraz ze wzrostem wskaźnika zagęszczenia zwiększyły się o 6 kPa, a adhezji o 4 kPa.



Ryc. 2. Wpływ zagęszczenia na wartości parametrów wytrzymałości na ścinanie i opory tarcia międzyfazowego

Fig. 2. Compaction influence on values of shear strength and interphase friction resistance parameters

Tabela 3. Wartości parametrów charakteryzujących wytrzymałość na ścinanie mieszaniny popiołowo-żużłowej i opór tarcia międzyfazowego

Table 3. Values of shear strength parameters of ash-slag mixture and interphase friction resistance parameters

Wskaźnik zagęszczenia Compaction index	Mieszanina popiołowo-żużłowa Ash-slag mixture				Układ: mieszanina-geowłóknina System: ash-slag mixture–nonwoven geotextiles			
	Kąt tarcia wewnętrznego* Angle of internal friction*		Spójność* Cohesion*		Kąt tarcia międzyfazowego Interphase friction angle		Adhezja Adhesion	
	$\varphi$	$\varphi_{sr}$	$c$	$c_{sr}$	$\varphi_a$	$\varphi_{a sr}$	$c_a$	$c_{a sr}$
	°		kPa		°		kPa	
0,90	35,7	35,2	18,6	19,9	33,4	33,5	24,4	22,6
	34,7		21,2		33,6		20,8	
0,95	40,0	38,5	19,8	23,3	34,5	35,1	23,8	24,2
	36,9		26,7		35,6		24,6	
1,00	42,2	42,5	23,0	26,0	37,0	37,8	27,8	26,5
	42,8		28,9		38,6		25,1	

\* za Gruchot i Resiula 2011– according to Gruchot and Resiula 2011



Mieszanina popiołowo-żużlowa cechowała się wyższymi wartościami kąta tarcia wewnętrznego średnio od około  $2^\circ$  do blisko  $5^\circ$  w stosunku do kąta tarcia międzyfazowego na kontakcie mieszanina – geosyntetyk. W przypadku spójności, jej wartości były niższe o blisko 3 kPa od wartości adhezji dla badań przy wskaźniku zagęszczenia  $I_s = 0,90$  oraz poniżej 1 kPa przy wskaźniku zagęszczenia  $I_s = 0,95$  i  $1,00$ .

### Współczynnik tarcia międzyfazowego

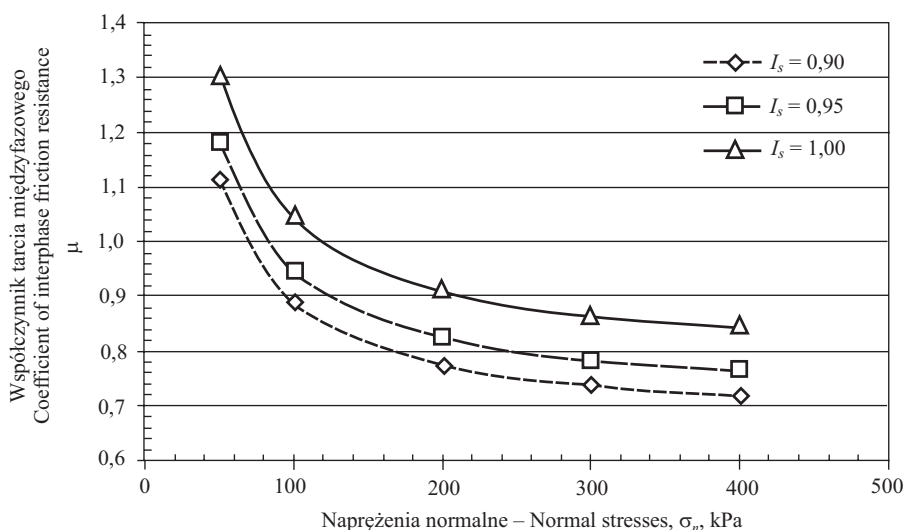
Wartość współczynnika tarcia międzyfazowego wyznaczona z formuły (1) zależna była od naprężenia pionowego  $\sigma_n$  i wraz z jego wzrostem zmniejszała się. Wzrost naprężeń normalnych od 50 kPa do 400 kPa powodował zmniejszenie jego wartości o około 36% przy wszystkich zastosowanych zagęszczeniach (tab. 4). Natomiast wzrost wskaźnika zagęszczenia od  $I_s = 0,90$  do  $I_s = 1,00$  spowodował zwiększenie wartości współczynnika tarcia międzyfazowego od około 11% przy naprężeniu normalnym  $\sigma_n = 400$  kPa do 28% przy naprężeniu  $\sigma_n = 50$  kPa.

Analiza zależności współczynnika tarcia międzyfazowego od naprężeń normalnych (ryc. 3) wykazuje, że przy każdym zagęszczeniu mieszaniny, jego wartości, po początkowym silnym spadku przy naprężeniach normalnych w zakresie 50–200 kPa, wykazały tendencję do stabilizacji przy dalszym zwiększaniu naprężeń do 400 kPa.

Tabela 4. Wyniki obliczeń współczynnika tarcia międzyfazowego według wzorów (1) i (2)  
Table 4. Results of coefficient of interphase friction resistance calculations according to formula (1) and (2)

Wskaźnik zagęszczenia Compaction index $I_s$	Kąt tarcia wewnętrznego Angle of internal friction $\phi_i, ^\circ$	Kąt tarcia międzyfazowego Interphase friction angle $\phi_a, ^\circ$	Adhezja Adhesion $c_a, \text{kPa}$	Współczynnik tarcia międzyfazowego $\mu$ według wzoru Coefficient of interphase friction resistance $\mu$ according to formula					
				(1)			(2)		
				Naprężenia normalne – Normal stresses $\sigma_n, \text{kPa}$					
				50	100	200	300	400	–
0,90	35,2	33,5	22,6	1,11	0,89	0,77	0,74	0,72	0,35
0,95	38,5	35,1	24,2	1,19	0,94	0,82	0,78	0,76	0,40
1,00	42,5	37,8	26,5	1,31	1,04	0,91	0,86	0,84	0,46

Natomiast współczynnik tarcia obliczony według formuły (2) uwzględniającej jedynie kąt tarcia wewnętrznego materiału zasypki, cechuje się znacznie niższymi wartościami: od 0,35 przy  $I_s = 0,90$  do 0,46 przy  $I_s = 1,00$ .



Ryc. 3. Zależność współczynnika tarcia międzyfazowego od naprężeń normalnych dla układu mieszanina popiołowo-żużłowa–geowłóknina

Fig. 3. The dependence of the coefficient of interphase friction resistance on normal stress for the system: ash-slag mixture–nonwoven geotextiles

## PODSUMOWANIE

Mieszanina popiołowo-żużłowa z Elektrowni „Skawina”, odpowiadająca według nomenklatury geotechnicznej kilkufrakcyjnym piaskom pylastym, cechowała się wysokimi wartościami kąta tarcia wewnętrznego i spójności zależnymi wyraźnie od zagęszczenia. Również wartości kąta tarcia międzyfazowego i adhezji, na kontakcie mieszanina popiołowo-żużłowa – geowłóknina Secutex 401-GRK 5C były wysokie, co przełożyło się na duże wartości współczynnika tarcia międzyfazowego.

Uzyskane wyniki wskazują na korzystne parametry wytrzymałościowe badanej mieszaniny popiołowo-żużłowej jako materiału samodzielniego, a także w układzie z geowłókniną. Potwierdza to przydatność mieszaniny do celów budownictwa ziemnego.

## PIŚMIENNICTWO

- Ajdukiewicz J., 2003. Strome nasypy drogowe zbrojone geosyntetykami. Mat. XIII Krajowej Konferencji Mechaniki Gruntów i Fundamentowania. Gliwice – Szczyrk, 371–386.
- Bouazza A., Wei M.J., 1993. Large shear box tests on reinforced colliery spoils. Proc. IV International Symposium on the Reclamation, Treatment and Utilization of Coal Mining Wastes. Kraków, 127–134.
- Bugajski M., Grabowski W., 1999. Geosyntetyki w budownictwie drogowym. Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej Poznań.
- Gruchot A., Resiuła E., 2011. Wpływ zagęszczenia i nawodnienia na wytrzymałość na ścinanie mieszaniny popiołowo-żużłowej i stateczność wykonanego z niej nasypu. Górn. Geoinż. 2, 257–264.

- Kawalec J., Gołos M., 2007. Budowa przyczółków mostowych z gruntu zbrojonego w technologii Tensor. Mat. Konferencji „Trwałe obiekty mostowe w środowisku. EKO MOST 2006, Kielce, 211–219.
- Leśniewska D., Kulczykowski M., 2001. Grunt zbrojony jako materiał kompozytowy. Podstawy projektowania konstrukcji. Wydawnictwo IBW PAN, Gdańsk.
- Maro L., 2010. Geosyntetyki do powierzchniowego wzmocnienia gruntu. Poradnik projektanta i wykonawcy. Lemar Łódź.
- Naue [serwis internetowy], [www.naue.com](http://www.naue.com).
- PN-EN ISO 14688:2006. Badania geotechniczne. Oznaczenie i klasyfikacja gruntów. Polski Komitet Normalizacyjny Warszawa.
- PN-S-02205:1998. Drogi samochodowe. Roboty ziemne – Wymagania i badania. Polski Komitet Normalizacyjny Warszawa.
- Sawicki A., Leśniewska D., 1993. Grunt zbrojony. Teoria i zastosowanie. Wyd. Naukowe PWN Warszawa.
- Skarżyńska K., 1997. Odpady powęglowe i ich zastosowanie w inżynierii lądowej i wodnej. Wyd. Akademii Rolniczej Kraków.
- Sobolewski J., 2006. Uwagi do zasad projektowania nasypów ze zbrojeniem geosyntetycznym w podstawie, w tym nasypów na terenach górniczych. Inżyn. Budow. 10, 548–552.
- Wysokiński L., Kotlicki W., 2008. Projektowanie konstrukcji oporowych, stromych skarp i nasypów z gruntu zbrojonego geosyntetykami. Instrukcje, wytyczne, poradniki nr 429/2008. Instytut Techniki Budowlanej Warszawa.

*Zaakceptowano do druku – Accepted for print: 18.12.2013*