

WPLYW ZAGĘSZCZENIA, WILGOTNOŚCI I PRĘDKOŚCI ŚCINANIA NA WYTRZYMAŁOŚĆ NA ŚCINANIE MIESZANINY POPIOŁOWO-ŻUŻLOWEJ

Andrzej Gruchot, Magdalena Łojewska

Uniwersytet Rolniczy w Krakowie

Streszczenie. W pracy przedstawiono wyniki badań wytrzymałości na ścinanie mieszaniny popiołowo-żużlowej z Elektrowni „Skawina” przy różnym jej zagęszczeniu, wilgotności oraz prędkości ścinania. Stwierdzono, że wartości kąta tarcia wewnętrznego i spójności wraz ze wzrostem zagęszczenia zwiększały się dla przyjętych wilgotności mieszaniny i prędkości ścinania. Natomiast wzrost wilgotności spowodował zmniejszenie parametrów wytrzymałości na ścinanie dla przyjętych prędkości ścinania. Przeprowadzone badania pozwalają prognozować wysoką przydatność mieszaniny do celów budownictwa drogowego.

Słowa kluczowe: mieszanina popiołowo-żużłowa, wytrzymałość na ścinanie

WSTĘP

Produkcja energii elektrycznej w Polsce oparta jest w 70% na spalaniu węgla kamiennego i brunatnego. Jest to spowodowane posiadaniem przez kraj dużych zasobów tych paliw kopalnych. Występowanie w węglu znacznych ilości substancji niepalnych (11–17% w węglu kamiennym oraz 3–11% w brunatnym) powoduje powstawanie dużej ilości tzw. ubocznych produktów spalania (UPS). Są to przede wszystkim popioły lotne, żużle i mieszaniny popiołowo-żużłowe, ale także mikrosfery, popioły z kotłów fluidalnych, gips z odsiarczania spalin metodą mokrą wapienną, odpady z odsiarczania spalin metodami półsuchymi i suchymi [Galos i Uliasz-Bocheńczyk 2005].

W zależności od jakości i kaloryczności węgla oraz stopnia jego zapopielenia powstaje od 35 do 220 g odpadów energetycznych na każdą kilowatogodzinę wytwarzanej energii energetycznej oraz cieplej [Hycnar 1984]. Popioły lotne i żużle stanowią ponad 15% ogólnej ilości nagromadzonych w Polsce odpadów przemysłowych uciążliwych dla środowiska [Galos i Uliasz-Bocheńczyk 2005].

Kompleksowe rozwiązanie kwestii związanych z bezpieczną utylizacją odpadów poenergetycznych jest zagadnieniem skomplikowanym, powodującym wiele problemów

dotyczących ochrony środowiska naturalnego. Odpady te najczęściej wykorzystuje się w budownictwie ogólnym do produkcji ceramiki budowlanej oraz w budownictwie ziemnym do robót inżynierijno-drogowych. Rozwój technik spalania węgla w paleniskach energetycznych, a także wymogi ochrony środowiska wpływają na rodzaj, ilość i jakość stałych odpadów spalania węgla i odsiarczania spalin [Galos i Uliasz-Bocheńczyk 2005]. Dlatego ocena przydatności tych odpadów do celów budownictwa ziemnego powinna być każdorazowo poprzedzona określeniem ich właściwości geotechnicznych, a przede wszystkim wytrzymałości na ścinanie. Wzrost wykorzystania mieszanin popiołowo-żużlowych generuje również znaczące korzyści związane z ochroną środowiska, a także ekonomiczne [Duszyński i Śliwińska-Serafin 2007, Gruchot i Zawisza 2007].

CEL I ZAKRES BADAŃ

Celem badań było określenie wpływu zagęszczenia, wilgotności oraz prędkości ścinania na parametry wytrzymałości na ścinanie, tj. kąta tarcia wewnętrznego i spójności, mieszaniny popiołowo-żużlowej pobranej ze składowiska Elektrowni „Skawina”.

Podstawowe właściwości fizyczne oraz parametry zagęszczalności oznaczono metodami standardowymi. Skład uziarnienia określono metodą łączoną – 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 przeprowadzono w standardowym aparacie bezpośredniego ścinania w skrzynce o wymiarach w przekroju poprzecznym $12,0 \times 12,0$ cm i wysokości próbki 7,7 cm z ramkami pośrednimi tworzącymi strefę ścinania o wysokości 10 mm. Do badań wykorzystano materiał o uziarnieniu poniżej 10 mm, przyjmując, że średnica maksymalnego ziarna będzie odpowiadać wysokości strefy ścinania. Próbkę do badań formowano bezpośrednio w skrzynce aparatu przy trzech wskaźnikach zagęszczenia, tj. $I_s = 0,90, 0,95$ i $1,00$. Wilgotność mieszaniny w trakcie formowania próbek odpowiadała wilgotności optymalnej (30,6%) oraz o 5% mniejszej (26%) i większej (36%) od optymalnej. Próbkę poddano obciążeniu o wielkości 50, 100 i 200 kPa, a następnie ścinano przy prędkości $0,1 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ oraz $1,0 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ do uzyskania 10% odkształcenia poziomego próbki. Obliczenia parametrów wytrzymałości na ścinanie przeprowadzono metodą najmniejszych kwadratów dla kryterium ścięcia odpowiadającemu wartości maksymalnej naprężeń ścinających [PN-EN ISO 14668-2:2004, PKN-CEN ISO/TS 17892-10:2009].

WYNIKI BADAŃ I ICH ANALIZA

Właściwości fizyczne

Według nomenklatury geotechnicznej [PN-EN ISO 14688-2:2006] mieszanina popiołowo-żużlowa została sklasyfikowana jako kilkufrakcyjne piaski pylaste (siSa). W składzie uziarnienia dominowała frakcja piaszkowa w ilości około 64%, frakcji pyłowej było 21%, a ilowej około 2% (tab. 1). Zawartość frakcji zwirowej nie przekraczała 14%.

Gęstość właściwa szkieletu wynosiła średnio $2,54 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$. Maksymalna gęstość objętościowa szkieletu wynosiła średnio $1,26 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ przy wilgotności optymalnej około 31% [Gruchot i Resiuła 2011].

Tabela 1. Charakterystyka geotechniczna mieszanki popiołowo-żuźlowej

Table 2. Geotechnical characteristics of the ash-slag mixture

Parametr – Parameter	Wartość – Value		
	próbka – sample		średnia mean
	1	2	
Zawartość frakcji – Fraction content, %:			
- żwirowa – gravel, Gr 63–2 mm	13,7	13,7	13,7
- piaskowa – sand, Sa 2–0,063 mm	62,8	64,3	63,5
- pyłowa – silt, Si 0,063–0,002 mm	21,9	20,3	21,1
- ilowa – clay, Cl <0,002 mm	1,6	1,7	1,7
	siSa	siSa	siSa
Nazwa wg PN-EN ISO 14688-2:2006 Soil name acc. to PN-EN ISO 14688:2006	Piasek pylasty Silty sand		
Zawartość cząstek – Content of particles, %:			
≤ 0,075 mm	24,5	24,5	24,5
≤ 0,02 mm	12,0	12,0	12,0
Wskaźnik jednorodności uziarnienia Uniformity coefficient	13,5	13,5	13,5
Gęstość właściwa szkieletu, $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ Density of solid particles, $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	2,53	2,54	2,54
Wilgotność optymalna*, % Optimum moisture content*, %	30,0	31,2	30,6
Maksymalna gęstość objętościowa szkieletu*, $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ Maximum dry density of solid particles*, $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	1,258	1,268	1,263

* za – acc. to Gruchot i Resiuła 2011

Wytrzymałość na ścinanie

Wartości kąta tarcia wewnętrznego uzyskane dla obydwu prędkości ścinania, trzech wilgotności i trzech zagęszczeń zawierały się w przedziale od około 32 do 46° , a wartości spójności od 9 do 48 kPa (tab. 2).

Kąt tarcia wewnętrznego uzyskany przy prędkości ścinania $0,1 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ zwiększył się średnio o $8,4^\circ$ wraz ze wzrostem wskaźnika zagęszczenia I_s od $0,90$ do $1,00$ (rys. 1). Również w przypadku prędkości ścinania $1,0 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ zaobserwowano zwiększenie kąta tarcia wewnętrznego wraz ze wzrostem wskaźnika zagęszczenia w zakresie od $6,5$ do $3,5^\circ$ odpowiednio do wzrostu wilgotności od 26 do 36% .

W przypadku spójności uzyskanej przy prędkości ścinania $0,1 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ wzrost wskaźnika zagęszczenia nie spowodował istotnego zwiększenia jej wartości dla przyjętych wilgotności mieszanki. Natomiast w przypadku większej prędkości ścinania ($1,0 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$) zaobserwowano średnio 2-krotne zwiększenie spójności wraz ze wzrostem wskaźnika zagęszczenia.

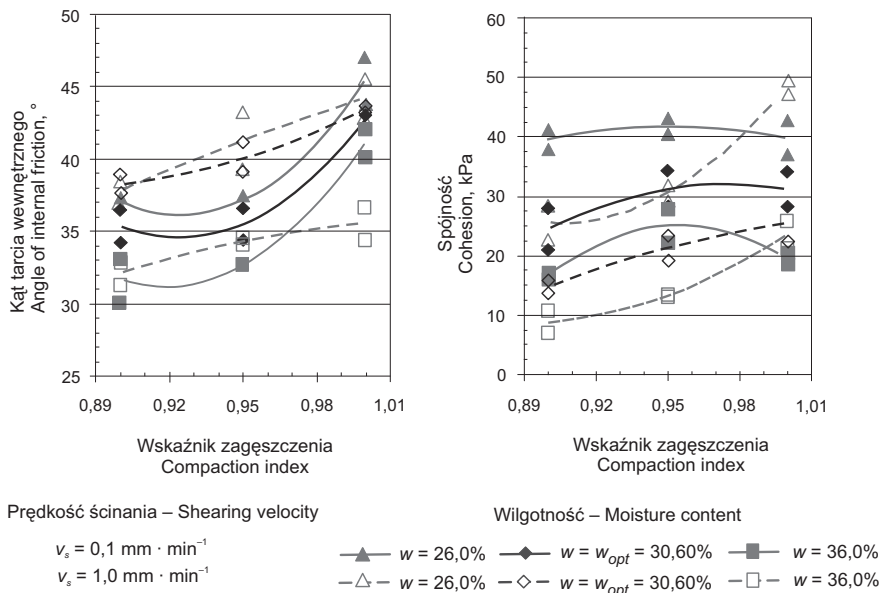
Tabela 2. Wartości kąta tarcia wewnętrznego i spójności mieszaniny popiołowo-żuźlowej
 Table 2. Values of the angle of internal friction and cohesion of the ash-slag mixture

Wskaźnik zagęszczenia Compaction index I_s	Prędkość ścinania Shearing velocity							
	0,1 mm · min ⁻¹				1,0 mm · min ⁻¹			
	Kat tarcia wewnętrznego Angle of internal friction °		Spójność Cohesion kPa		Kat tarcia wewnętrznego Angle of internal friction °		Spójność Cohesion kPa	
	ϕ	ϕ_{sr}	c	c_{sr}	ϕ	ϕ_{sr}	c	c_{sr}
$w = w_{opt} - 5\% \cong 26\%$								
0,90	36,8	37,2	41,3	39,6	37,0	37,7	22,7	25,6
	37,5		37,9		38,4		28,5	
0,95	37,5	37,2	43,1	41,8	43,2	41,3	29,3	30,6
	36,8		40,4		39,3		31,9	
1,00	47,0	45,5	37,0	39,9	42,9	44,2	47,3	48,4
	43,9		42,8		45,5		49,4	
$w = w_{opt} \cong 30,6\%$								
0,90	36,5	35,4	21,0	23,4	39,3*	39,1*	13,8*	14,8*
	34,2		27,9		38,9*		15,7*	
0,95	36,6	35,5	28,2	31,2	41,1*	40,1*	19,1*	21,3*
	34,4		34,1		39,0*		23,4*	
1,00	43,0	42,7	28,2	31,2	43,2*	43,4*	22,3*	25,3*
	42,4		34,2		43,6*		28,3*	
$w = w_{opt} + 5\% \cong 36\%$								
0,90	33,2	31,6	17,1	16,7	31,3	32,1	10,9	9,0
	30,1		16,2		32,8		7,0	
0,95	32,8	32,7	27,7	25,0	34,5	34,3	13,1	13,4
	32,6		22,3		34,1		13,6	
1,00	42,2	41,2	18,7	19,6	36,7	35,6	21,2	23,5
	40,2		20,4		34,4		25,8	

* za – acc. to Gruchot i Resiuła 2011

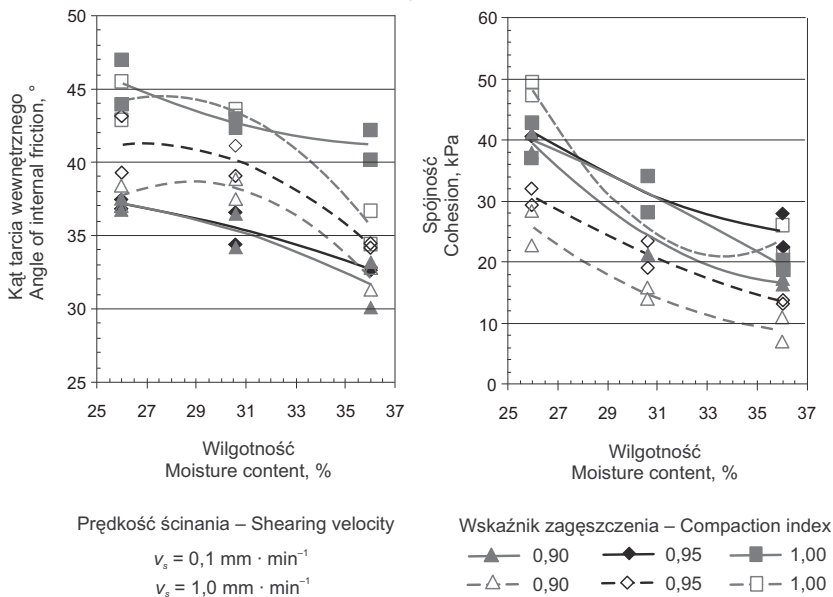
Analizując wpływ wilgotności na kąt tarcia wewnętrznego i spójność, stwierdzono, że ich najwyższe wartości uzyskano przy wilgotności o 5% mniejszej, a najniższe przy wilgotności o 5% większej od optymalnej przy obydwu prędkościach ścinania (rys. 2). Zakres różnic kąta tarcia wewnętrznego pomiędzy kolejnymi wartościami wilgotności nie przekraczał 3°, jedynie przy prędkości ścinania 1,0 mm · min⁻¹ pomiędzy wilgotnością optymalną i o 5% większą od niej różnice te wynosiły około 7°. Zmniejszenie spójności wraz ze wzrostem wilgotności wahały się w dość szerokim zakresie i wynosiły od około 2 do 23 kPa.

Nie stwierdzono wyraźnego wpływu prędkości ścinania na wartości kąta tarcia wewnętrznego i spójności. Wartości kąta tarcia wewnętrznego uzyskane przy wyższej prędkości ścinania (1,0 mm · min⁻¹) były większe od 0,5 do około 5°. Jedyne dla próbek przy wskaźniku zagęszczenia $I_s = 1,00$ i wilgotności o 5% mniejszej i większej od optymalnej wyższe wartości kąta tarcia wewnętrznego odpowiednio do wilgotności o 1,3 i 5,6° uzyskano przy mniejszej prędkości ścinania (0,1 mm · min⁻¹).



Rys. 1. Wpływ zagęszczenia na wartości parametrów wytrzymałości na ścinanie mieszanki popioło-żuźlowej przy różnej wilgotności i prędkości ścinania

Fig. 1. Influence of compaction on values of the shear strength parameters of the ash-slag mixture at various moisture contents and shearing velocities



Rys. 2. Wpływ wilgotności na wartości parametrów wytrzymałości na ścinanie mieszanki popioło-żuźlowej przy różnym zagęszczeniu i prędkości ścinania

Fig. 2. Influence of moisture content on values of the shear strength parameters of the ash-slag mixture at various compactions and shearing velocities

Większe wartości spójności uzyskano przy mniejszej prędkości ścinania – zakres różnic pomiędzy obydwoma prędkościami ścinania wahał się od około 6 do 14 kPa. Również w przypadku spójności przy wskaźniku zagęszczenia $I_s = 1,00$ i wilgotności o 5% mniejszej i większej od optymalnej większe jej wartości o około 4 i 9 kPa uzyskano przy wyższej prędkości ścinania.

PODSUMOWANIE

Podsumowując, należy stwierdzić, że wartości kąta tarcia wewnętrznego i spójności wraz ze wzrostem wskaźnika zagęszczenia I_s od 0,90 do 1,00 zwiększały się przy wszystkich wartościach wilgotności i prędkości ścinania. Natomiast wzrost wilgotności w zakresie od 25 do 36% spowodował zmniejszenie parametrów wytrzymałości na ścinanie dla obydwu prędkości ścinania.

Analizując wpływ prędkości ścinania można stwierdzić, że większa prędkość ścinania – $1,0 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$, pozwoliła uzyskać wyższe wartości kąta tarcia wewnętrznego oraz niższe wartości spójności w stosunku do prędkości $0,1 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$.

Przeprowadzone badania wytrzymałości na ścinanie mieszaniny popiołowo-żużlowej z Elektrowni „Skawina” wskazują, że cechuje się ona dużymi wartościami kąta tarcia wewnętrznego i spójności, co pozwala prognozować wysoką jej przydatność do celów budownictwa drogowego.

PIŚMIENNICTWO

- Duszyński A., Śliwińska-Serafin E., 2007. Mieszanki popiołowo-żużłowe – identyfikacja dla zastosowania w budownictwie drogowym. Materiały konferencji „Popioły z Energetyki”, EKOTECH Sp. z o.o., Międzyzdroje – Szczecin.
- Galos K., Uliasz-Bocheńczyk A., 2005. Źródła i użytkowanie popiołów lotnych ze spalania węgla w Polsce. *Gospod. Surow. Miner.* 21, 1, 23–42.
- Gruchot A., Resiuła E., 2011. Wpływ zagęszczenia i nawodnienia na wytrzymałość na ścinanie mieszaniny popiołowo-żużlowej i stateczność wykonanego z niej nasypu. *Gór. Geoinż.* 2, 257–264.
- Gruchot A., Zawisza E., 2007. Badania parametrów geotechnicznych wybranych odpadów przemysłowych w aspekcie wykorzystania ich do budownictwa drogowego. *Prz. Gór.* 10, 26–32.
- Hycnar J.J. 2009. Eurocoalash weryfikacja popiołów ze spalania węgla. *Energ. Nauka Przem.* 1, 48-52.
- PN-B-04481:1988. Grunty budowlane. Badanie próbek gruntu. Komitet Normalizacji Miar i Jakości Warszawa.
- PN-EN ISO 14668-2:2004 Badania geotechniczne. Oznaczanie i klasyfikowanie gruntów. Cz. 2: Zasady klasyfikowania. Polski Komitet Normalizacyjny Warszawa.
- PKN-CEN ISO/TS 17892-10:2009. Badania geotechniczne. Badania laboratoryjne gruntów. Cz. 10: Badanie w aparacie bezpośredniego ścinania. Polski Komitet Normalizacyjny Warszawa.

INFLUENCE OF COMPACTION, MOISTURE CONTENT AND SHEARING VELOCITY ON THE SHEAR STRENGTH OF THE ASH-SLAG MIXTURE

Abstract. The work presents results of tests of shear strength of the ash-slag mixture from the Power Plant „Skawina”, at its various compaction, moisture content and at different shear velocities. It was stated, that the values of the angle of internal friction and cohesion increased with the rise of compaction for the assumed values of moisture content of the mixture and shearing velocity. However, the increase of the moisture content caused the decrease of the shear strength parameters for the assumed shearing velocities. The carried out tests make it possible to forecast the big usefulness of the mixture for road engineering purposes.

Keywords: ash-slag mixture, shear strength

Accepted for print – Zaakceptowano do druku: 5.12.2011