GEOLOGIA • 2007 • Tom 33 • Zeszyt 4 • 439–462

WŁAŚCIWOŚCI MIESZANIN GRUNTOWO-POPIOŁOWYCH I ICH WYKORZYSTANIE W INŻYNIERII ŚRODOWISKA

Properties of soil-ash mixtures and their use in environmental engineering

Stanisław RYBICKI[1], Katarzyna GÓRNIAK[2] & Adam GAWEŁ[2]

Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Geologii, Geofizyki i Ochrony Środowiska,
[1] Zakład Hydrogeologii i Geologii Inżynierskiej,
[2] Zakład Mineralogii, Petrografii i Geochemii;
al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków;
e-mail: rybicki@geol.agh.edu.pl, gorniak@uci.agh.edu.pl, agawel@agh.edu.pl

Treść: W pracy przedstawiono wyniki badań właściwości mieszanin spoistego gruntu zwałowego z odkrywkowej kopalni „Turów" z popiołami lotnymi elektrowni „Turów", spalającej węgiel brunatny z tej kopalni. Do gruntu zwałowego składającego się głównie z iłów mioceńskich z domieszką piasków i żwirów dodawano trzy rodzaje, o różnej zawartości procentowej, popiołu: nieodsiarczany, odsiarczany z palenisk pyłowych i odsiarczany z palenisk fluidalnych. Popioły z gruntem przy wilgotności optymalnej wiązały przez 28 dni, a następnie na próbkach mieszanin oznaczano niektóre cechy fizyczno-mechaniczne oraz skład fazowy, mineralny i rodzaje mikrostruktur. Podobne badania układu fazowego, mineralnego i mikrostruktur wykonano dla składników wyjściowych mieszanin, to jest trzech rodzajów popiołów lotnych oraz dla gruntu zwałowego. W wyniku badań stwierdzono głównie wzrost parametrów wytrzymałości na ścinanie, a zwłaszcza spójności mieszanin z popiołami fluidalnymi, oraz opisano warunkujące ten wzrost zmiany i osobliwości składu mineralnego, fazowego oraz mikrostruktury mieszanin. Wskazano też na kierunki zastosowań mieszanin popiołowo-gruntowych w inżynierii środowiska.

Słowa kluczowe: popioły, grunty zwałowe, cechy geotechniczne, skład mineralny i fazowy

Abstract: The paper presents the results of studies on physico-mechanical, mineralogical and structural properties of mixtures composed of cohesive dump soils originating from the "Turów" lignite open pit mine and fly ash derived from the "Turów" power plant, which burns lignite from this mine. The dump soils, which include mostly Miocene clays with minor sands and gravels were mixed with variable proportions of raw fly ash, desulphurized fly ash from pulverized fuel furnaces and desulphurized fly ash from fluidized fuel furnaces. Fly ash and soil mixtures have been subjected to setting for 28 days under the optimum moisture content. Then physical and chemical properties, phase composition, mineralogical composition and microstructures were determined. Similar properties were measured for soils and for three types of fly ash. The results demonstrated the increasing shear strength parameters – mainly cohesion, particularly for mixtures of fluidized fly ash and soil. The changes and pecularities of mineral and phase compositions, and mixrostructures were described, which control the properties of mixtures. The possible applications of fly ash and soil mixtures in environment engineering were proposed.

Key words: ashes, dump soils, geotechnical properties, phase and mineral composition

WSTĘP

W wielu przypadkach grunty rodzime lub nasypowe nie mają wystarczająco korzystnych właściwości geotechnicznych jako podłoże budowlane lub materiał konstrukcyjny budowli ziemnych. Jednym ze sposobów poprawy tych właściwości są dodatki innych materiałów, często różnych odpadów przemysłowych, zwłaszcza mających cechy wiążące. Materiałami o pewnych cechach wiążących są między innymi popioły elektrowniane ze spalania węgla brunatnego. Przeprowadzono więc badania mieszanin popiołów lotnych z elektrowni „Turów" oraz gruntów zwałowych z nadkładu złoża węgla brunatnego Turów. Grunty zwałowe są po zmieszaniu z popiołami deponowane w wyrobisku poeksploatacyjnym kopalni „Turów". Oczekuje się, że takie mieszaniny gruntowo-popiołowe będą mieć lepsze właściwości geotechniczne, a tworzone z nich skarpy i poziomy zwałowiska wewnętrznego będą bardziej wytrzymałe i stabilne. Wykonane badania są częściową odpowiedzią na te oczekiwania, zarówno w zakresie oceny wartości niektórych cech geotechnicznych mieszanin, jak i warunkujących te cechy reakcji fizykochemicznych, struktury i składu mineralnego mieszanin oraz składników wyjściowych.

WŁAŚCIWOŚCI SKŁADNIKÓW WYJŚCIOWYCH UŻYTYCH DO BADAŃ

Materiał

Materiał do badań stanowiły surowce odpadowe: odpady energetyczne i odpady poeksploatacyjne z elektrowni oraz Kopalni Węgla Brunatnego „Turów".

Odpady energetyczne reprezentują produkty spalania węgla brunatnego w paleniskach konwencjonalnych (pyłowych) bez odsiarczania oraz z odsiarczaniem spalin (popioły lotne pyłowe nieodsiarczane i odsiarczane), a ponadto w paleniskach fluidalnych (popioły lotne i denne fluidalne z produktami odsiarczania spalin).

Odpady poeksploatacyjne stanowią utwory dolnego i środkowego miocenu pochodzące z kompleksu międzywęglowego i nadwęglowego wyróżnianych w serii węglonośnej niecki żytawskiej. Są one deponowane na zwałowisku wewnętrznym KWB „Turów" (Ciuk *et al*. 1992). Głównie są to iłowce kaolinitowe w różnym stopniu pylaste i zapiaszczone (Stępisiewicz 1987), których udział w profilu miocenu węglonośnego wynosi 64%, podczas gdy udział węgla brunatnego wynosi 23%, a utworów piaszczystych – 13% (Kozydra & Wyrwicki 1970).

Metody badań

Skład fazowy popiołów, skład mineralny odpadów poeksploatacyjnych oraz skład fazowy i mineralny mieszanin gruntowo-popiołowych określono rentgenograficzne. Wykorzystano refleksyjny monochromator grafitowy oraz dyfraktometr rentgenowski Philips X'Pert, stosując następujące parametry: promieniowanie CuK_{α}, napięcie lampy 35 kV, prąd lampy 30 mA. Fazy mineralne i minerały wchodzące w skład badanych próbek zidentyfikowano na podstawie danych zawarte w katalogu ICDD (*International Centre for Diffraction Data*) i program komputerowy XRAYAN.

Mikromorfologię składników popiołów i odpadów poeksploatacyjnych oraz mikrostruktury mieszanin gruntowo-popiołowych badano przy użyciu mikroskopów. Zastosowano mikroskop polaryzacyjny do światła przechodzącego oraz skaningowy mikroskop elektronowy z emisją polową (FESEM) FEI Quanta 200FEG wyposażony w mikroanalizator rentgenowski (EDX Genesis) umożliwiający analizę składu chemicznego obserwowanych obiektów.

Charakterystyka popiołów

Skład chemiczny

Skład chemiczny popiołów wybranych do badań (Tab. 1) jest systematycznie kontrolowany przez elektrownię „Turów" i, jak wynika z tych danych, w ostatnich latach jest dość stabilny.

Tabela (Table) 1

Skład chemiczny popiołów z elektrowni „Turów"

Average bulk-chemical composition [wt. %] of the fly ashes from the "Turów" power plant

Składnik [% wag.] *Component [wt. %]*	Popioły *Ashes*		
	pyłowe *pulverized*		fluidalne *fluidized*
	nieodsiarczane *undesulphurized* PI	odsiarczane *sulphurized* PIII	PII
SiO_2	49.28	44.58	36.21
Fe_2O_3	6.93	6.01	5.13
Al_2O_3	33.62	30.91	26.74
Mn_3O_4	0.06	0.05	0.05
TiO_2	1.04	1.06	1.41
CaO	2.06	10.86	16.24
MgO	0.91	0.99	1.44
SO_3	0.63	2.06	6.38
P_2O_5	0.13	0.09	0.14
Na_2O	0.68	0.56	0.59
K_2O	1.99	1.51	2.06
Straty prażenia *Loss of ignition*	2.12	1.24	1.98

Popioły pyłowe, zarówno nieodsiarczane jak i odsiarczane, biorąc pod uwagę stosunek zawartości SiO_2 do Al_2O_3 oraz zawartość CaO i SO_3, można określić jako krzemianowo-glinowe (SiO_2 /Al_2O_3 nie przekracza 2, a udział CaO jest mniejszy niż 15%).

Popioły fluidalne są siarczanowo-wapniowe (SiO_2 /Al_2O_3 nie przekracza 2, ale udział CaO jest większy niż 15% i zawartość SO_3 przekracza 3%).

Wyraźnie większa zawartość SO_3 w popiołach fluidalnych w porównaniu z odsiarczanymi popiołami pyłowymi (Tab. 1) wskazuje na lepszą efektywność pierwszej z wymienionych technik oczyszczania spalin i większy w nich udział składnika korzystnie wpływającego na właściwości samowiążące mieszanin popiołowo-gruntowych, jakim jest anhydryt (Enders 1995).

Wedle klasyfikacji Roya i współautorów (Goodarzi 2006), skonstruowanej według kryterium zawartości głównych tlenków, wszystkie badane próbki mieszczą się w polu popiołów żelazowo-wapniowo-krzemianowo-glinowych (Fig. 1).

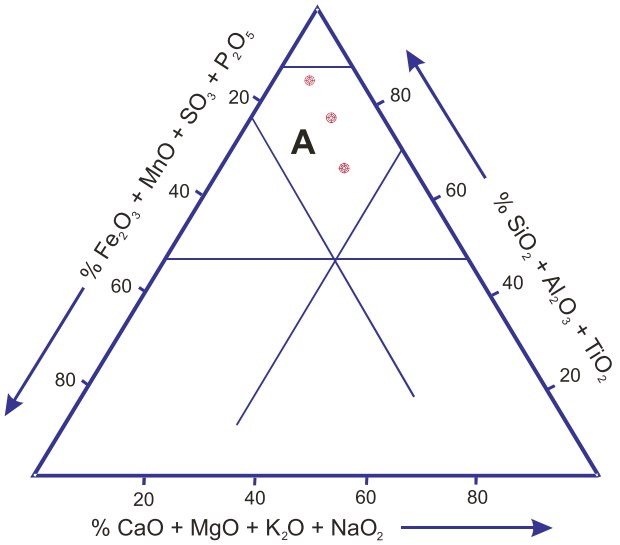

Fig. 1. Klasyfikacja popiołów z elektrowni „Turów" oparta na zawartości tlenków (podział Roy *et al.* 1981, *vide* Goodarzi 2006). Objaśnienia: A – popioły żelazowo-wapniowo-krzemianowo-glinowe

Fig. 1. Classification of ashes from the "Turów" power plant based on their major oxides in a ternary diagram of Roy *et al*. 1981 (In: Goodarzi 2006). Explanations: A – ferrocalsialic ashes

Skład fazowy i mikromorfologia ziaren

Skład fazowy popiołów wybranych do badań przedstawiono w tabeli 2.

Popioły pyłowe nieodsiarczane i odsiarczane. W popiołach pyłowych, zarówno nieodsiarczanych jak i odsiarczanych, poza fazami amorficznymi występuje mullit, kwarc, magnetyt oraz skaleń potasowy, a ponadto pojawia się glinian wapnia ($CaAl_2O_4$) i glinian trójwapniowy ($Ca_3Al_2O_6$). Popioły pyłowe odsiarczane zawierają ponadto anhydryt, który jest produktem odsiarczania spalin. Fazy amorficzne (szkliwo, niespalony węgiel) oraz gliniany i anhydryt można uznać za składniki wpływającymi korzystnie na właściwości samowiążące i sorpcyjne mieszanin popiołowo-gruntowych.

Szkliwo w popiołach pyłowych, zarówno nieodsiarczanych, jak i odsiarczanych, występuje głównie w formie ziaren kulistych (cenosfery) (Fig. 2A, B) zwykle pustych wewnątrz, cienko i grubościennych (Fig. 2B), często tworzących ziarna agregatowe (Fig. 3)

A) B)

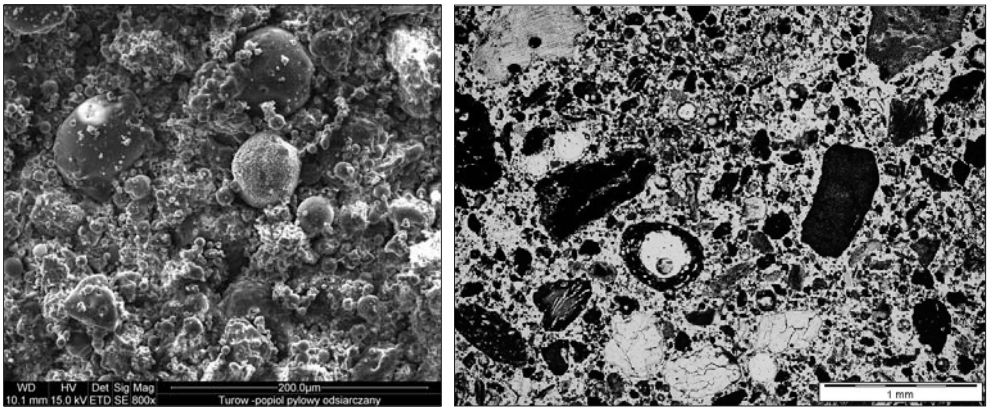

Fig. 2. Cenosfery cienko- i grubościenne (przezroczyste, kuliste), magnetosfery (nieprzezroczyste, kuliste), niespalone okruchy węgla (nieprzezroczyste, porowate, nieregularne, niektóre o budowie warstwowej) oraz spękane ziarna kwarcu w popiołach pyłowych z elektrowni „Turów". A) SEM; B) mikroskop optyczny, 1 polaroid

Fig. 2. Glassy spheres: thin- and thick-walled cenospheres (amorphous, nonopaque, spherical), magnetite spheres (opaque, spherical)), unburnt char particles (amorphous, opaque, vesicular, some of them showing layered internal structure) and cracked quartz grains in pulverized fly ashes from the "Turów" power plant. A) SEM; B) light microscopy (LM), plane-polarized light

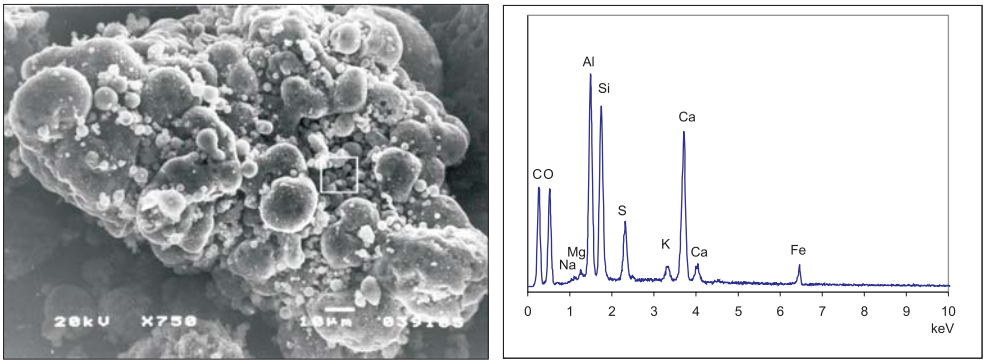

Fig. 3. Ziarno agregatowe zbudowane z cenosfer cementowanych anhydrytem. Popiół pyłowy odsiarczany z elektrowani „Turów". SEM/EDX

Fig. 3. Aggregate grain containing cenospheres cemented by anhydrite. Pulverized fly ash with flue gas desulfurization (FGD) sludge from the "Turów" power plant. SEM/EDX

Spotykane są ponadto plerosfery i ziarna nieregularne, zaokrąglone, zwykle większe od cenosfer. W składzie chemicznym szkliwa poza Si i Al występują K i Ca oraz Na, Mg i Fe (Fig. 4A). Spotykane są cenosfery zasobne (Fig. 4A) i ubogie w Ca (Fig. 4B).

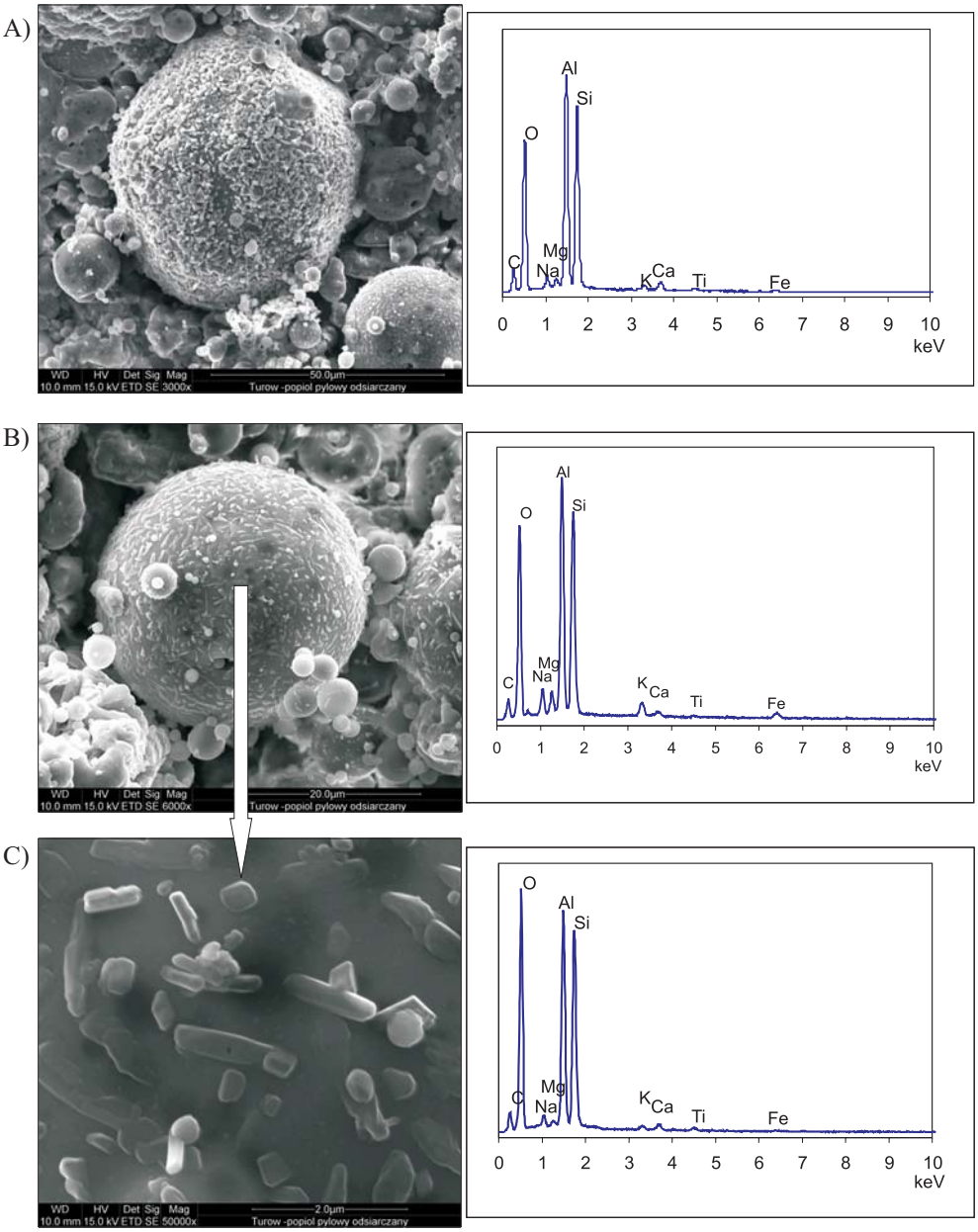

Fig. 4. Procesy rozpuszczania szkliwa widoczne na powierzchni cenosfery (A), mullit i kwarc powstałe w wyniku rekrystalizacji szkliwa cenosfery (B, C). Popiół pyłowy odsiarczany z elektrowni „Turów". SEM/EDX

Fig. 4. Dissolution of glassy phase on the surface of cenosphere (A), mullite and quartz formed by the recrystallisation of a glassy phase within a cenosphere (B, C). Pulverized fly ash with FGD sludge from the "Turów" power plant. SEM/EDX

Z przeprowadzonych przez Endersa (1995) badań popiołów niemieckich wynika, że ostatnie z wymienionych są mniej reaktywne. Gieré *et al*. (2003) badając pojedyncze cenosfery w popiołach amerykańskich, stwierdzili homogeniczność składu chemicznego w obrębie cenosfer szklistych i cenosfery różniące się składem chemicznym. Na heterogeniczność składu chemicznego cenosfer zwracają uwagę również Querol *et al*. (1994) w przypadku popiołów hiszpańskich.

Szkliwo w badanych popiołach z powodu obecności żelaza zwykle jest brunatne i niekiedy zawiera przerosty magnetytu. Magnetyt ponadto występuje w formie pełnych cenosfer (magnetosfery) (Fig. 2B).

Powierzchnia cenosfer zbudowanych ze szkliwa zwykle jest czysta, ale na niektórych ziarnach obserwuje się procesy podobne do opisanych przez Halse *et al*. (1984) wskazujące na reaktywność tego składnika badanych popiołów. Są to procesy rozpuszczania szkliwa (Fig. 4A) i krystalizacji na powierzchni cenosfer glinianów, mullitu i autigenicznego kwarcu (Fig. 4B, C).

Ziarna detrytycznego kwarcu i skaleni są ostrokrawędziste i wykazują spękania termiczne (Fig. 2).

Popioły pyłowe nieodsiarczane różnią się od odsiarczanych dużą ilością niespalonych okruchów węgla. Są to zwykle ziarna osiągające ponad 1 mm, nieregularne, porowate, gąbczaste (Fig. 2B i 5) lub o budowie warstwowej (Fig. 2B), brunatne i nieprzezroczyste (Fig. 2B).

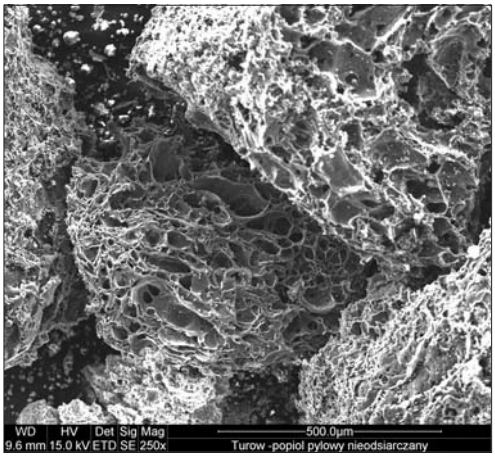

Fig. 5. Niespalone okruchy węgla. Popiół pyłowy nieodsiarczany z elektrowni „Turów". SEM

Fig. 5. Unburnt char particles. Pulverized fly ash from the "Turów" power plant. SEM

Popioły pyłowe odsiarczane zawierają anhydryt występujący zarówno w formie osobnych ziaren, jak i cementu w ziarnach agregatowych zbudowanych z cenosfer (Fig. 3). W popiołach pyłowych nieodsiarczanych anhydryt występuje rzadziej, tworząc pojedyncze, bardzo drobne kryształy gromadzące się na cenosferach (Fig. 6). Podobne formy występowania anhydrytu czy też faz zasobnych w Ca i S stwierdzane zostały przez wielu autorów, szczególnie w popiołach wysokowapniowych (m.in. Fisher *et al*. 1978, Enders 1995, Rataj-

czak *et al*. 1999, Gieré *et al*. 2003). Ostatni z wymienionych dokumentują wiązanie pierwiastków śladowych przez fazy zasobne w Ca i S, ale zwracają uwagę na łatwą rozpuszczalność tych faz. Bahranowski *et al*. (1999) stwierdzili stosunkowo łatwą wymywalność wapnia z popiołów powstałych ze spalania węgla brunatnego, co skutkuje alkalizacją środowiska.

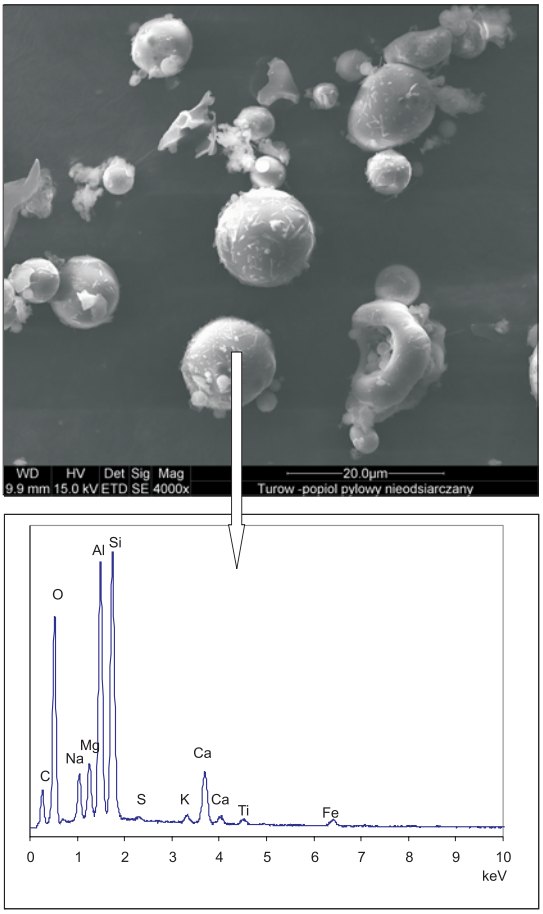

Fig. 6. Cenosfery oskorupione siarczanami. Popiół pyłowy nieodsiarczany z elektrowni „Turów". SEM/EDX

Fig. 6. Cenospheres coated with sulphates. Pulverized fly ash from the "Turów" power plant. SEM/EDX

Popioły fluidalne. W popiołach fluidalnych poza fazami amorficznymi stwierdzony został illit, kwarc, skalenie i hematyt, a ponadto produkty związane z procesem odsiarczania spalin: tlenek wapnia, portlandyt, anhydryt, kalcyt i glinian trójwapniowy ($Ca_3Al_2O_6$) (Tab. 2).

Tabela (Table) 2

Skład fazowy i mineralny surowców odpadowych z elektrowni i kopalni węgla brunatnego „Turów" oraz sporządzonych z nich mieszanin określony jakościowo na podstawie badań rentgenograficznych i mikroskopowych

Qualitative mineral and phase composition of selected industrial by-products from the "Turów" power plant and lignite mine as well as the mixtures prepared of them (determined by XRD and by microscopy)

Faza/minerał *Phase/mineral*		Popioły / *Ashes*			Odpady poeksploatacyjne (grunty) *dump soil* B	Mieszaniny popiołowo-gruntowe *Soil-ashes mixtures*		
		pyłowe / *pulverized*		fluidalne *fluidized*				
		nieodsiarczane *undesulphurized* PI	odsiarczane *sulphurized* PIII			PI + B	PIII + B	PII + B
fazy amorficzne: *amorphous phases:*	szkliwo *glass*	+	+			+	+	
	niespalony węgiel *unburnt char particles*	+	+			+	+	
	pozostałość po dehydroksylacji minerałów ilastych *product of thermal decomposition of clay minerals*			+				+
mullit *mullite*		+	+			+	+	
kwarc *quartz*		+	+	+	+	+	+	+
skalenie *feldspars*		+	+	+	+	+	+	+
magnetyt (hematyt) *magnetite (hematite)*		+	+	+		+	+	+
glinian wapniowy *calcium aluminate*		+		+				
glinian trójwapniowy *tricalcium aluminate*		+	+	+				
portlandyt *portlandite*				+				
kalcyt *calcite*				+				
tlenek wapnia *lime*				+				
anhydryt *anhydrite*			+	+			+	+
muskowit (illit) *muscovite (illite)*				+	+	+	+	+
kaolinit *kaolinite*					+	+	+	+
monosulfat *monosulfate*								+

Fazy amorficzne w popiołach fluidalnych tworzą nieregularne ziarna agregatowe, zwykle o dużej mikroporowatości wewnątrzziarnowej (Fig. 7A). Tworzą one również oskorupienia na ziarnach kwarcu i okruchach skał ilastych (Fig. 7B i 8A). Są to głównie amorficzne fazy glinokrzemianowe i amorficzna krzemionka powstające w wyniku dehydroksylacji minerałów ilastych, przy czym zachowują one, szczególnie produkty rozkładu kaolinitu, płytkową czy blaszkową mikromorfologię. Produkty te stanowią bardzo reaktywne składniki popiołów fluidalnych (por. Brandštetr *et al*. 1997). W ich składzie chemicznym występuje Al, Si, Na, Mg i K oraz w różnych proporcjach Ca (Fig. 9A, B). Podobnie jak w przypadku kanadyjskich popiołów fluidalnych (Goodarzi 2006) można w badanych popiołach wyróżnić fazy glinokrzemianowe bogate w wapń (Fig. 9A) i z wapniem (Fig. 9B). Obecność Ca można wiązać z gromadzeniem się bardzo drobnoziarnistego tlenku wapnia w obrębie agregatów zbudowanych z produktów rozkładu minerałów ilastych. Tlenek wapnia powstaje w wyniku termicznego rozkładu kalcytu dodawanego do węgla w procesie spalania fluidalnego w celu odsiarczania spalin. Występowanie amorficznych faz glinokrzemianowych, amorficznej krzemionki i tlenku wapnia pozwala oczekiwać właściwości hydraulicznych i pucolanowych tych popiołów (m.in. Brandštetr *et al*. 1997, Brylska & Gawlicki 2003) również w mieszaninach z gruntami.

Illit występuje jako relikt w stosunkowo dużych okruchach skał ilastych (Fig. 10), w których nie uległ on procesowi dehydroksylacji.

Kwarc (Fig. 8A, B) i skalenie tworzą ziarna ostrokrawędziste. Powierzchnia ziaren kwarcu (Fig. 7B i 8A) zwykle jest oskorupiona produktami rozkładu minerałów ilastych i kalcytu, ale spotykane są również ziarna czyste (Fig. 8B).

Hematyt tworzy zaokrąglone ziarna. Występuje on ponadto jako domieszka w opisanych powyżej oskorupieniach zbudowanych z faz glinokrzemianowych (Fig. 8A). Jak wynika z badań Goodarziego (2006), tlenki żelaza gromadzą się szczególnie w zewnętrznej części oskorupień wraz z tlenkiem wapnia.

A) B)

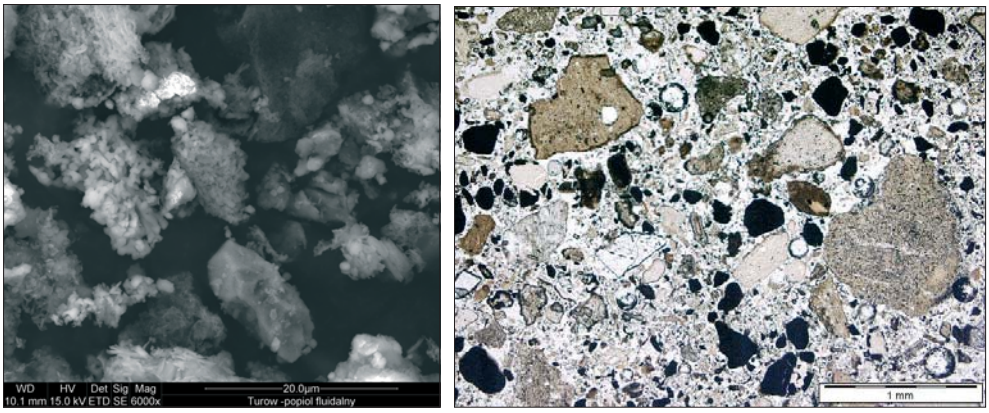

Fig. 7. Kanciaste, zwykle agregatowe i mikroporowate ziarna popiołu fluidalnego z elektrowni „Turów". A) SEM; B) mikroskop optyczny, 1 polaroid

Fig. 7. General view of fluidized fly ash from the "Turów" power plant showing angular, usually spongy particles. A) SEM; B) LM (plane-polarized light)

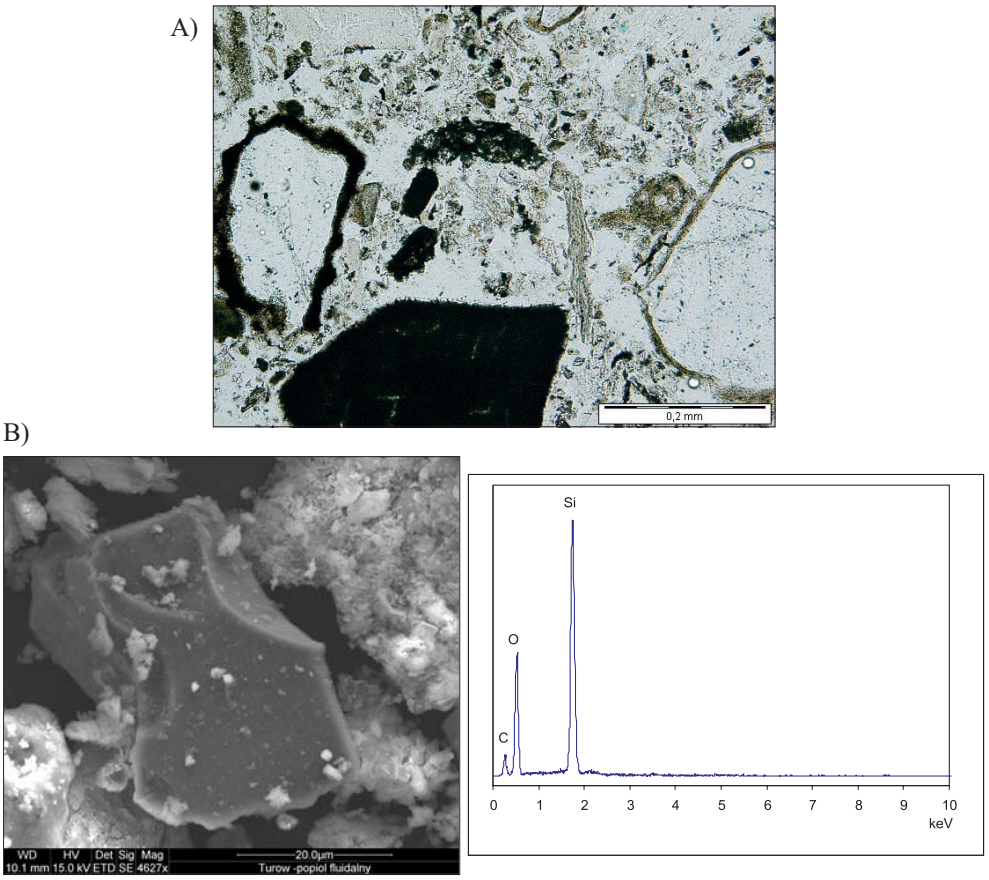

Fig. 8. Ziarna kwarcu oskorupione (A – mikroskop optyczny, 1 polaroid) i o czystej powierzchni (B – SEM/EDX). Popiół fluidalny z elektrowni „Turów"

Fig. 8. Quartz grains: coated (A – LM, plane-polarized light) and showing clean surface (B – SEM/EDX). Fluidized fly ash from the "Turów" power plant

Reliktowe ziarna kalcytu (Fig. 11 – a) oraz tlenku wapnia (Fig. 11 – b) stanowiącego produkt jego rozkładu termicznego, a ponadto anhydrytu (Fig. 11 – c) powstającego następnie w reakcji ostatniego z wymienionych ze spalinami, są zarówno ostrokrawędziste, jak i dość zaokrąglone. Niekiedy widoczne oskorupienia anhydrytu na ziarnach tlenku wapnia, wskazują na powierzchniową reakcję CaO z SO_x (Fig. 12).

Z uwagi na skład chemiczny, fazowy i morfologię ziaren, uważa się, że popioły fluidalne wykorzystane jako składnik gleb wpływają korzystnie na ich właściwości, między innymi stając się dla roślin łatwo dostępnym źródłem pierwiastków chemicznych (amorficzne fazy powstające w wyniku dehydroksylacji minerałów ilastych), a także regulując gospodarkę wodną (duża powierzchnia rozwinięta ziaren) i alkalizując (obecność tlenku wapnia) roztwory porowe (Puch 2001).

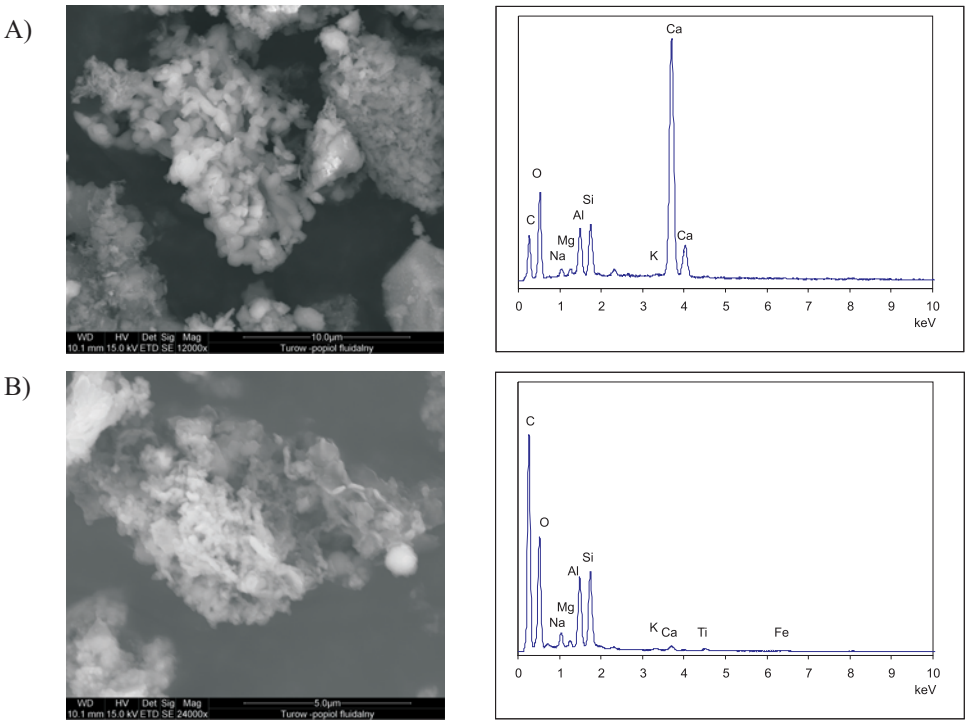

Fig. 9. Ziarna agregatowe zbudowane z faz glinokrzemianowych powstałych w wyniku dehydroksylacji minerałów ilastych z zachowaną ich mikromorfologią: A) bogate w Ca; B) zawierające Ca. Popiół fluidalny z elektrowni „Turów". SEM/EDX

Fig. 9. Amorphous aluminosilicate phases derived from thermal decomposition of clay minerals, forming aggregate grains. Micromorphology of clay minerals is preserved: A) calcium-rich aluminosilicates; B) aluminosilicates containing calcium. Fluidized fly ash from the "Turów" power plant. SEM/EDX

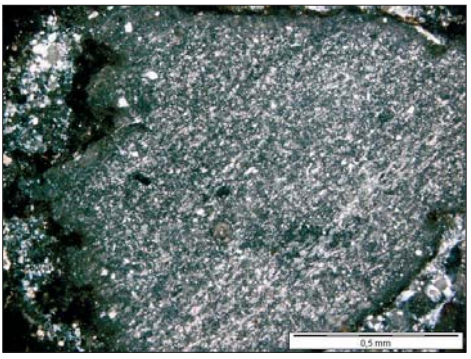

Fig. 10. Okruch skały z minerałami ilastymi o zachowanych cechach optycznych. Popiół fluidalny z kopalni „Turów". Mikroskop optyczny, polaroidy X

Fig. 10. Fragment of a clay-rich rock in fluidized fly ash from the "Turów" power plant. Optical properties of clay minerals are preserved. LM, cross-polarized light

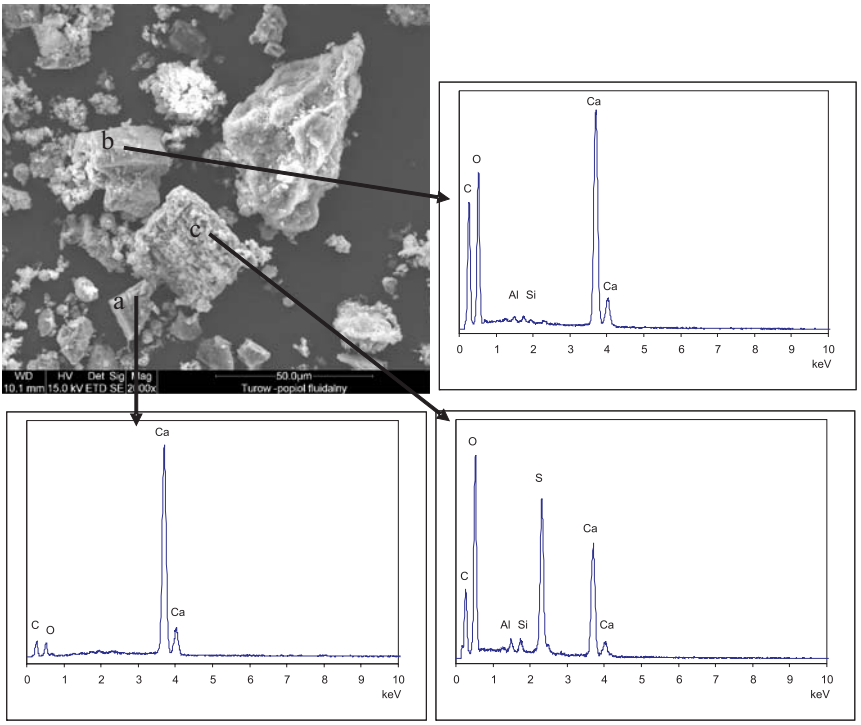

Fig. 11. Okruch wapienia (a), ziarno CaO (b) i ziarno anhydrytu (c) wśród drobnych ziarn agregatowych zbudowanych z faz glinokrzemianowych i dużych ziarn oskorupionych tymi fazami. Popiół fluidalny z kopalni „Turów". SEM/EDX

Fig. 11. Fragment of a limestone (a), a CaO grain (b) and an anhydrite grain (c) among fine, conglomerate particles composed of aluminosilicates and coarse, aluminosilicate-coated grains. Fluidized fly ash from the "Turów" power plant. SEM/EDX

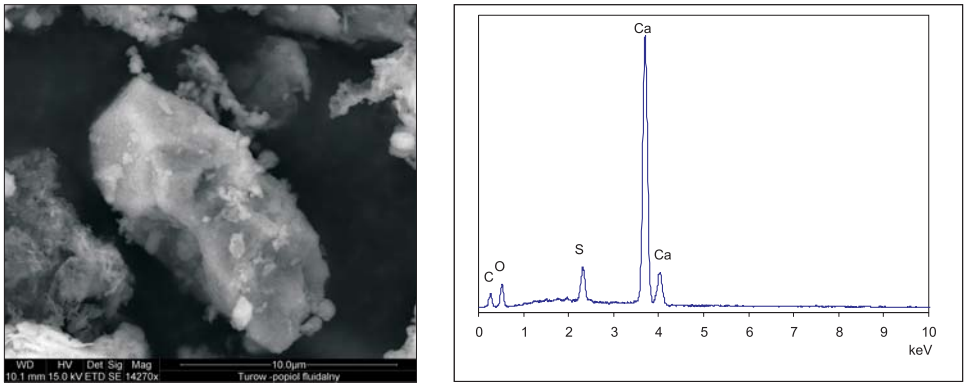

Fig. 12. Ziarno CaO oskorupione anhydrytem. Popiół fluidalny z kopalni „Turów". SEM/EDX

Fig. 12. CaO grain coated with anhydrite. Fluidized fly ash from the "Turów" power plant. SEM/EDX

Uziarnienie

Popioły pyłowe nieodsiarczane zawierają 31.5% frakcji drobniejszych niż piaskowa, należą więc do popiołów gruboziarnistych. Popioły pyłowe odsiarczane zawierają 67% wymienionych frakcji, są więc popiołami średnioziarnistymi (Tab. 3).

Tabela (Table) 3

Uziarnienie popiołów elektrowni „Turów"

Particle size distribution for the fly ashes from the "Turów" power plant

Udział frakcji ziarnowych [% wag.] *Content of fractions [wt. %]*	Popioły *Ashes*		
	pyłowe *pulverized*		fluidalne *fluidized* PII
	nieodsiarczane *undesulphurized* PI	odsiarczane *sulphurized* PIII	
iłowa *clay*	7.5	15.5	7.0
pyłowa *silt*	24.0	51.5	19.5
piaskowa *sand*	68.5	33.0	6.2
żwirowa *gravel*	0.0	0.0	11.5

W popiołach pyłowych, szczególnie nieodsiarczanych, przeważają zbudowane ze szkliwa ziarna kuliste (cenosfery), rzadziej występują ziarna nieregularne zaokrąglone (Fig. 2A). W popiołach pyłowych odsiarczanych ponadto występują w znaczącej ilości duże mikroporowate, nieregularne ziarna niespalonego węgla (Fig. 2B).

Popioły fluidalne zawierają tylko 26.5% frakcji drobniejszych niż piaskowa, należą więc do popiołów gruboziarnistych.

W popiołach fluidalnych dominują ziarna nieregularne lub ostrokrawędziste, zwykle wielofazowe (Fig. 7A, B).

Charakterystyka gruntów

Skład mineralny

Skład mineralny gruntów wykorzystanych w mieszaninach z popiołami zamieszczony jest w tabeli 2. Stwierdzony został w nich głównie kaolinit, a ponadto minerały grupy mik (illit, muskowit) oraz kwarc i skalenie. Są to skały ilaste zapiaszczone o mikrostrukturze detrytycznej typu matrix (klasyfikacja wg Keller 1978). Przestrzenie porowe nie są większe od 1 μm.

Składniki ilaste skały (kaolinit, a także illit) tworzą bezładnie ułożone agregaty zbudowane z różnej wielkości płytek i blaszek. Kontakty międzyziarnowe w tych agregatach są typu ściana-ściana (Fig. 13). Wielkość opisywanych agregatów nie przekracza kilku mikrometrów. W takim tle spotykane są kaolinitowe pseudomorfozy po skaleniach i mikach

osiągające kilkanaście mikrometrów, zbudowane z blaszek jednakowej wielkości (agregaty kolumnowe) (Fig. 13). Płytkowy pokrój minerałów ilastych, jak wynika z badań Górniak *et al*. (1999), powoduje, że w mieszaninach z popiołami mogą rozwijać się agregaty schodkowo kontaktujących ze sobą ziaren (mostki ilaste) wiążące szkielet mieszaniny.

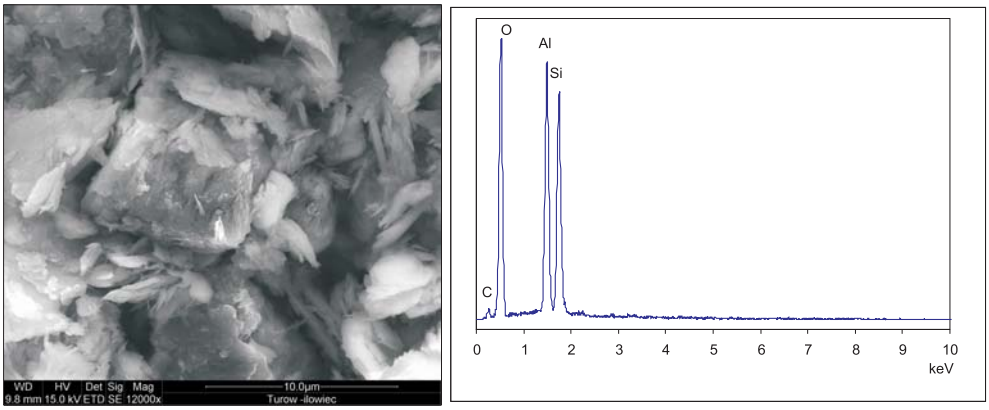

Fig. 13. Agregaty płytek kaolinitu w iłowcu: duży, kolumnowy zbudowany z jednakowej wielkości płytek wśród drobnych, utworzonych z płytek o różnej wielkości. Odpad poeksploatacyjny ze zwałowiska wewnętrznego kopalni „Turów". SEM/EDX

Fig. 13. Kaolinite in claystone: large, columnar aggregate consisting of plates equal in size buried in the fine clamps formed by plates different in size. The waste dumps from the "Turów" mine. SEM/EDX

Składnikami nieilastymi skały są kwarc, skalenie, muskowit i okruchy skał obcych. Ich ziarna osiągają wielkość mieszczącą się w zakresie frakcji piaskowej. Są one zwykle słabo obtoczone. Kwarc występuje jako ziarna mono- i polikrystaliczne (mozaikowe). Spotyka się nieliczne skalenie i muskowit zarówno świeże, jak i skaolinityzowane. Wśród okruchów skał obcych reprezentowane są granitoidy i łupki kwarcowo-serycytowe.

Uziarnienie

Grunty zwałowe wykorzystane w mieszaninach z popiołami pobrano ze zwałowiska zewnętrznego (próba A) i wewnętrznego (próba B) KWB „Turów", jako próby workowe stanowiące mieszaninę różnych rodzajów iłu, iłu ze żwirem, mułku, piasku pylastego itp. Po rozdrobnieniu i zhomogenizowaniu prób do oznaczenia uziarnienia metodą sitowo-areometryczną wyodrębniono mniejsze próbki średnie, których używano później w mieszaninach z popiołami. W składzie próbki B było 7% frakcji iłowej, 27% frakcji pyłowej, 31.5% frakcji piaskowej i 34.5% frakcji żwirowej. W składzie próbki A było 31% frakcji iłowej, 30% frakcji pyłowej, 31.5% frakcji piaskowej oraz 7.5% frakcji żwirowej. Według klasyfikacji geotechnicznej próbka B była pospółką gliniastą (Pog), a próbka A iłem (I).

Niektóre cechy fizyczne gruntu zwałowego

Grunty zwałowe użyte do badań są według klasyfikacji geotechnicznej gruntami spoistymi (skała ilasta). Ich wilgotność naturalna w zwałowisku wynosi średnio 28.6%, wa-

hając się od około 12% do 54% (Rybicki *et al*. 1999). Próbki użyte do badań były w stanie powietrznosuchym. Granice plastyczności i płynności próbki A wynosiły odpowiednio 29.97% i 59.37%, a próbki B odpowiednio 25.89% i 54.64%. Parametry wytrzymałości na ścinanie – kąt tarcia wewnętrznego (ϕ) i spójność (c):

– próbka A c = 22.0 kPa, ϕ = 21.3°;
– próbka B c = 21.5 kPa, ϕ = 21.5°.

Próbki te ścinano przy wilgotności optymalnej, wynoszącej w wypadku próbki A 22.1%, a w wypadku próbki B 17.5%. Ścinane próbki pozostawały więc w półzwartym stanie konsystencji.

WŁAŚCIWOŚCI MIESZANIN POPIOŁOWO-GRUNTOWYCH

Metodyka badań i przygotowanie próbek

Próbki średnie gruntu (A, B) przesiano przez sito o średnicy oczek 5 mm, uzyskując grunt w postaci bryłek i okruchów o średnicy poniżej 5 mm. Frakcji powyżej 5 mm w badaniach nie używano. Grunty te zwilżono do wilgotności optymalnej, a następnie mieszano je z w różnych proporcjach z każdym z trzech rodzajów powietrznosuchego popiołu. Mieszanki konsolidowano w cylindrach o średnicy 50 mm pod obciążeniem 500 kPa przez godzinę, a następnie przechowywano w szczelnym opakowaniu przez 28 dni, w celu związania popiołu z gruntem. Po 28 dniach oznaczano gęstość objętościową i wilgotność końcową próbek oraz poddawano je ścinaniu w aparacie trójosiowym przy ciśnieniach bocznych 200 kPa, 300 kPa i 400 kPa, a także badaniom składu mineralnego i fazowego oraz mikrostruktur.

Skład mineralny i fazowy

Skład mineralny i fazowy mieszanin popiołowo-gruntowych przedstawia tabela 2.

W mieszaninie zawierającej popiół pyłowy nieodsiarczany stwierdzono kaolinit i minerały grupy mik (wprowadzone ze skałą ilastą), oraz fazy amorficzne (szkliwo wraz z niespalonym węglem), mullit i magnetyt pochodzące z popiołu. Obecność kwarcu i skaleni związana jest zarówno z popiołem, jak i ze skałą ilastą.

Mieszaninę, w której użyty został popiół pyłowy odsiarczany, różni od opisanej powyżej obecność anhydrytu wprowadzonego z tym popiołem.

W mieszaninie zawierającej popiół fluidalny stwierdzono kaolinit pochodzący ze skały ilastej oraz fazy amorficzne (produkty dehydroksylacji minerałów ilastych) i anhydryt, kalcyt, a także magnetyt pochodzące z popiołu. Kwarc, minerały grupy mik oraz skalenie można powiązać z obu składnikami mieszaniny, a pojawiające się w niej fazy cementowe (monosulfat $Ca_4Al_2(OH)_{12}(SO_4)H_2O$) – z uaktywnieniem w tych warunkach właściwości pucolanowych popiołu. Wskazuje to na większą reaktywność popiołu fluidalnego niż popiołów pyłowych w mieszaninie z gruntami. Na reaktywność popiołów powstających w wyniku spalania węgla w kotłach fluidalnych i ich właściwości samowiążące zwraca uwagę m.in. Puch (2001). Autor ten wskazuje na możliwość wykorzystania na dużą skalę takich popiołów w budownictwie, do rekultywacji wyrobisk górniczych.

Mikrostruktury

W obrazach mikrostruktur mieszanin z popiołami pyłowymi zaznacza się udział frakcji grubszych niż ilasta i pojawia się rodzaj szkieletu ziarnowego. Rolę szkieletu pełnią ziarna kwarcu, skaleni, okruchów skał obcych i mik oraz ceno-, plero-, magnetosfery i nieregularne ziarna szkliwa, a także niespalone fragmenty węgla. Należy tu zauważyć, że w omawianych mieszaninach rolę szkieletu ziarnowego spełniają również kuliste ziarna szkliwa (cenosfery) o średnicach mniejszych niż wielkość ziaren frakcji piaskowej (Fig. 14A, B i 15A, B).

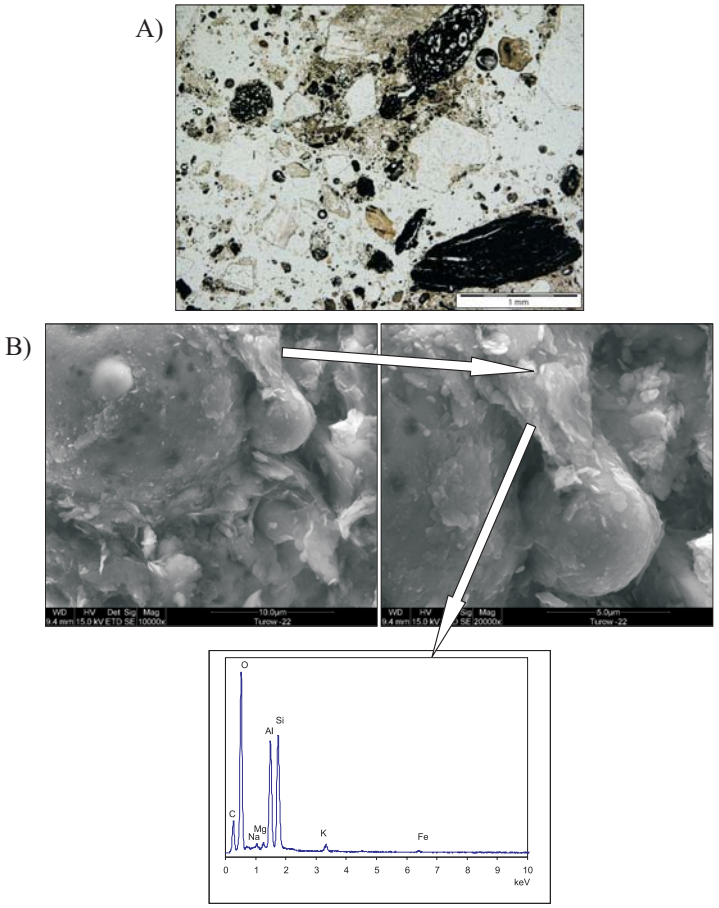

Fig. 14. Mikrostruktura popiołowo-iłowa wiązana przez mostki ilaste (schodowo kontaktujące ze sobą płytki kaolinitu i blaszki minerałów grupy mik). Mieszanina popiołu pyłowego nieodsiarczanego (elektrownia „Turów") i gruntu ilastego (odpad poeksploatacyjnym z kopalni „Turów"). A) mikroskop optyczny, 1 polaroid; B) SEM/EDX

Fig. 14. Ash-clayey, clay link-bonded microstructure (the links between skeletal grains are made by the chains of kaolinite plates and mica flakes in a stepped face- to -face arrangements). A mixture of pulverized ash (by-product from the "Turów" power plant) and claystones (waste dump from the "Turów" mine). A) LM, plane-polarized light); B) SEM/EDX

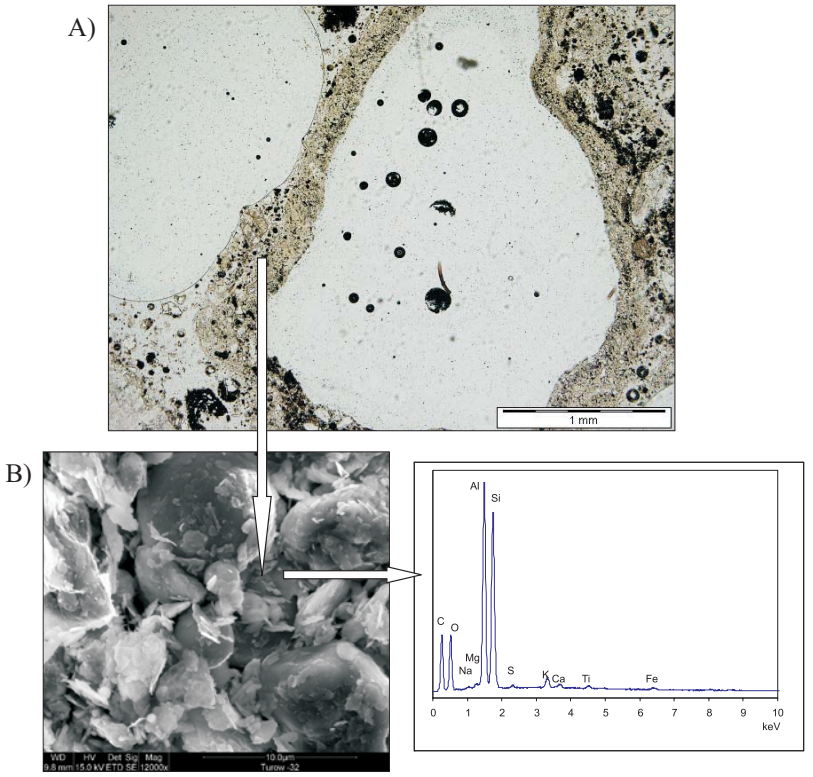

Fig. 15. Mikrostruktura popiołowo-iłowa wiązana przez mostki ziarnisto-ilaste (schodowo kontaktujące ze sobą płytki kaolinitu i blaszki minerałów grupy mik z ziarnami siarczanów). Mieszanina popiołu pyłowego odsiarczanego (elektrownia „Turów") i gruntu ilastego (odpad poeksploatacyjny z kopalni „Turów"). A) mikroskop optyczny, 1 polaroid; B) SEM/EDX

Fig. 15. Ash-clayey, clay and granular link –bonded microstructure (the links between skeletal grains are made by the chains of kaolinite plates and mica flakes in a stepped face-to-face arrangements as well as grains of sulphates). A mixture of pulverized ash with FGD sluge (by-product from the "Turów" power plant) and claystones (waste dump from the "Turów" mine). A) LM, plane-polarized light); B) SEM/EDX

Szkielet ziarnowy w mieszaninach z popiołami pyłowymi nieodsiarczanymi jest stosunkowo słabo oskorupiony minerałami ilastymi i wiązany przez krótkie mostki ilaste (Fig. 14B). W mieszaninach z popiołami odsiarczanymi oskorupienie na ziarnach szkieletu jest grubsze i oprócz minerałów ilastych tworzą je niekiedy również siarczany. Również mostki łączące ziarna w omawianych mieszaninach niekiedy są też siarczanowo-ilaste (Fig. 15B). Mikrotekstury obu mieszanin są mikroporowate.

Mikrostruktury mieszanin popiołowo-gruntowych określono, używając zmodyfikowanych klasyfikacji stosowanych w odniesieniu do gleb i skał ilastych.

Mikrostruktury mieszanin zawierających popioły pyłowe zarówno nieodsiarczane (Fig. 14A, B), jak i odsiarczane (Fig. 15A, B) można określić jako popiołowo-iłowe, używając klasyfikacji O'Briena & Slatta (1990). Zgodnie z klasyfikacją Sergeyeva *et al*. (1980)

jest to mikrostruktura szkieletowa. Zgodnie z podziałem Guorui (1991) mikrostrukturę mieszaniny z popiołami nieodsiarczanymi można określić jako wiązaną przez mostki ilaste (zbudowane ze schodkowo kontaktujących ze sobą płytek i blaszek) (Fig. 14B). Według tej klasyfikacji mikrostrukturę mieszaniny z popiołami pyłowymi odsiarczanymi można opisać jako wiązaną przez mostki ziarnisto-ilaste (zbudowane z ziaren o pokroju blaszkowym i płytkowym z domieszką składników nieblaszkowych reprezentowanych przez siarczany) (Fig. 15B).

W obrazach mikrostruktury mieszanin z popiołami fluidalnymi (Fig. 16A, B) nie jest widoczny szkielet ziarnowy. Dominujące składniki mieszaniny mają pokrój płytkowy czy też blaszkowy. Tworzą stosunkowo cienkie agregaty, w których różnej wielkości blaszki i płytki tworzą kontakty typu ściana-ściana. Agregaty te są ułożone bezładnie. Siarczany oraz fazy cementowe występują zarówno wewnątrz niektórych agregatów, jak i wśród nich (Fig. 16B). Mikrotekstura tej mieszaniny jest zbita.

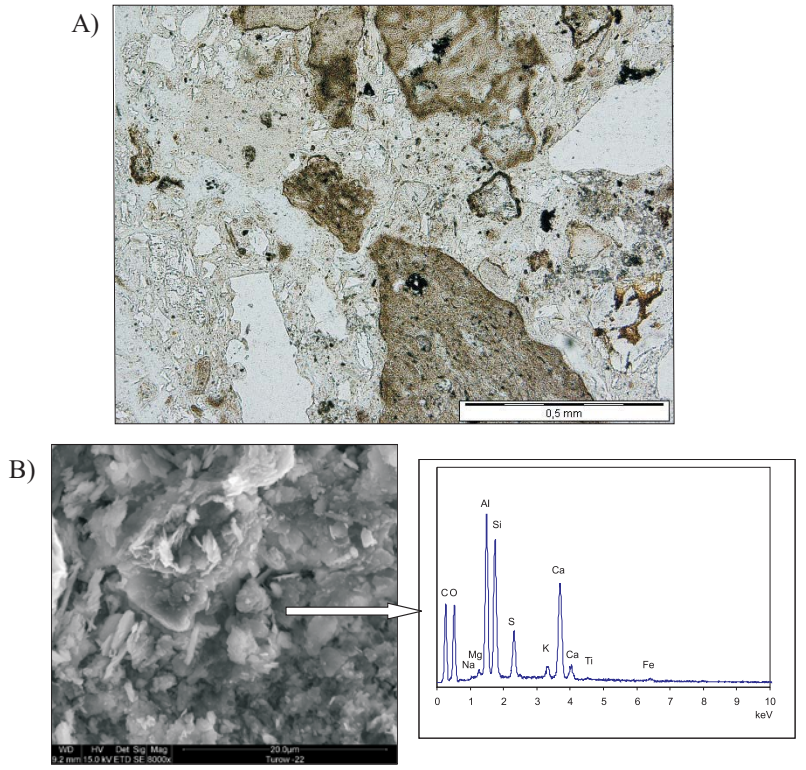

Fig. 16. Mikrostruktura iłowa (typu matrix) zbudowana głównie z agregatów ziarn o pokroju blaszkowym czy płytkowym. Mieszanina popiołu fluidalnego (elektrownia „Turów") i gruntu ilastego (odpad poeksploatacyjny z kopalni „Turów"). A) mikroskop optyczny, 1 polaroid; B) SEM/EDX

Fig. 16. Clayey microstructure (matrix type) consisting of clamps formed by plate or flake particles. A mixture of fluidized ash ("Turów" power plant) and claystones (waste dump from the "Turów" mine). A) LM, plane-polarized light; B) SEM/EDX

Mikrostrukturę mieszaniny zawierającej popioły fluidalne (Fig. 16A, B) można określić jako iłową, używając klasyfikacji O'Briena & Slatta (1990). Zgodnie z klasyfikacją Sergeyeva *et al*. (1980) jest to mikrostruktura typu matrix, podobnie jak w przypadku podziału Guorui (1991). Ostatni z wymienionych autorów ten typ mikrostruktury uważa za mniej ulegającą deformacjom mechanicznym niż mikrostruktury, w których szkielet wiązany jest przez mostki, szczególnie ilaste.

Właściwości fizykomechaniczne

Wilgotność wyjściowa mieszanin popiołowo-gruntowych była różna (15–22%), zależna od procentowej zawartości danego popiołu w stanie powietrznosuchym dodawanego do gruntu zwałowego, pozostającego w wilgotności zbliżonej do optymalnej (około 23%). Po 28 dniach wiązania popiołu z gruntem wilgotność mieszanek w większości próbek nieco się zmniejszała.

Stwierdzone wartości gęstości objętościowej mieszanin po związaniu także zależą od procentowego udziału popiołu, zmniejszając się systematycznie wraz ze wzrostem ilości popiołu w mieszance.

Parametry oporu ścinania mieszanek popiołowo-gruntowych, spójność i kąt tarcia wewnętrznego określono w aparacie trójosiowym dla 32 próbek (mieszanki trzech rodzajów popiołu PI, PII, PIII oraz gruntu zwałowego ze zwałowiska zewnętrznego (A) i wewnętrznego (B). Uzyskane wyniki przedstawiono w tabeli 4 (na wklejce).

Wyniki badań poszczególnych próbek charakteryzują się dużym rozrzutem parametrów oporu ścinania, co jest typową cechą gruntów antropogenicznych. Wynika to z niejednorodności badanych mieszanek, pewnych różnic w ich składzie litologicznym, lokalnych niejednorodności w mieszaniu popiołu z gruntem itp. Niemniej jednak widać wyraźnie związek pomiędzy parametrami oporu ścinania a rodzajem popiołu w mieszance i procentowym udziałem popiołu (Tab. 2). Spośród trzech użytych popiołów najlepsze właściwości wiążące, wyrażające się największymi oporami ścinania mieszanek, ma popiół odsiarczany (PII) z kotłów fluidalnych, gorsze popiół odsiarczany (PIII) z kotłów pyłowych, a najgorsze lub ich brak popiół nieodsiarczany (PI). Właściwości wiążące i wynikający z tego wzrost wytrzymałości mieszanek gruntowo-popiołowych użytych w badaniach popiołów odsiarczanych związane są z obecnością w nich wolnego tlenku wapnia (CaO) oraz siarczanu wapnia ($CaSO_4$) i pucolanowych właściwości popiołu. Popioły wzmacniając grunt, powodują znaczący wzrost spójności mieszanki w stosunku do spójności samego gruntu zwałowego przy stosunkowo małych zmianach kąta tarcia wewnętrznego mieszanek. Najlepsze efekty wiązania i zwiększania wytrzymałości mieszanek obserwuje się przy dodatku popiołów w zakresie 20–50% wagowych, a zwłaszcza 40–50%.

Wzrost wytrzymałości na ścinanie, ściskanie lub wzrost oporów penetracji sondowań mieszanek gruntowo-popiołowych wskutek wiążących właściwości popiołów sygnalizuje wielu autorów (Shenbaga *et al*. 1996, Prietto *et al*. 1998, Sava *et al*. 1998, Nishikawa *et al*. 2002). Trudno wyniki te porównać wprost z wynikami badań własnych autorów, ponieważ używano różnych gruntów, różnych popiołów i różnych procedur badawczych. W literaturze (Shenbaga *et al*. 1996) podaje się na przykład, że spójność mieszaniny popiołu z gruntem pylastym wzrastała wraz z procentowym udziałem dodawanego popiołu od 38 kPa

w gruncie bez dodatku popiołu, do 51 kPa przy dodatku 50% popiołu, a następnie zmniejszała się przy dalszym wzroście tego dodatku. Kąt tarcia wewnętrznego ulegał zaś tylko niewielkiemu wzrostowi: od 31° do 34°.

Także w innych badaniach (Prietto *et al*. 1998) podkreśla się wzrost spójności gruntu wraz ze zwiększeniem ilości dodawanego popiołu, lecz niewielkie zmiany kąta tarcia wewnętrznego. Cytowane badania dobrze więc korespondują z wynikami badań własnych autorów.

KIERUNKI ZASTOSOWAŃ MIESZANIN GRUNTOWO-POPIOŁOWYCH W INŻYNIERII ŚRODOWISKA

Popioły ze spalania węgla, a w szczególności węgla brunatnego, jako odpadowy materiał o cechach wiążących, były już i są używane w charakterze domieszek do gruntów rodzimych, nasypowych oraz innych materiałów odpadowych. Domieszki te mają spełniać w inżynierii środowiska dwie podstawowe funkcje – stabilizacji mechanicznej mieszaniny popiołu z innym gruntem lub materiałem oraz neutralizacji (buforowania) innych gruntów (materiałów) posiadających niskie wartości pH. Popioły bowiem, a ściśle biorąc – wyciągi wodne (odcieki) z popiołów, charakteryzują się dość wysokim pH, w granicach 8–12.5. W przypadku zwałowisk gruntów nadkładowych KWB „Turów" dodatki popiołów w ilości powyżej 20% wagowych powodują wielokrotny wzrost spójności mieszaniny i jej ogólnej wytrzymałości mechanicznej (na ścinanie i zgniatanie), co pozwala stosować te mieszaniny do stabilizacji osuwisk na skarpach zwałowisk, wzmacniania nośności poziomów zwału i ich przejezdności w transporcie kopalnianym, a także projektować zbocza zwału przy większych pochyleniach, oszczędzając teren zajmowany przez zwałowisko. Znane są też zastosowania w skali technicznej, półtechnicznej lub laboratoryjnej popiołów jako domieszek do innych materiałów odpadowych, np. do wzmocnienia, uszczelnienia i neutralizacji odpadów górnictwa węgla kamiennego (Szczepańska 2000), jako domieszek do stabilizacji innych odpadów, np. fosfogipsów (Abramski 1992), domieszek do gruntów aluwialnych przy budowie grobli i obwałowań (Paszyc-Stępkowska 1993) oraz w wielu innych sytuacjach związanych głównie z budownictwem ziemnym, komunikacyjnym, hydrotechnicznym, składowaniem odpadów itp.

WNIOSKI

Z przeprowadzonych badań wynika, że:

- różna mikromorfologia ziaren oraz skład fazowy popiołów pyłowych (PIII) i fluidalnych (PII) wpływają na zróżnicowanie mikrostruktur wykonanych z nich mieszanin popiołowo-gruntowych;
- w mieszaninach gruntów z popiołami pyłowymi powstaje szkielet ziarnowy stosunkowo słabo wiązany mostkami ilastymi (popioły nieodsiarczane) i mostkami siarczanowo-ilastymi (popioły odsiarczane);

– w mieszaninach gruntów z popiołami fluidalnymi powstaje mikrostruktura typu matrix łączona fazami cementowymi;
– dodatki popiołów lotnych do spoistych gruntów zwałowych z KWB „Turów" powodują różny wzrost wytrzymałości na ścinanie ich mieszanin zależny od rodzaju popiołu (mały wzrost w przypadku popiołów nieodsiarczanych, a stosunkowo duży w przypadku popiołów fluidalnych) oraz procentowego udziału popiołu; najlepsze efekty osiąga się przy dodatku popiołu w granicach 40–50% wagowych;
– mieszaniny popiołowo-gruntowe mogą być stosowane w inżynierii środowiska do poprawiania stateczności skarp i zboczy zwałowisk kopalnianych, stabilizacji poziomów odkrywek i zwałowisk, likwidacji osuwisk poprzez wymianę koluwium na mieszankę gruntowo-popiołową itp.; nie wykazują one większego negatywnego wpływu na środowisko.

Praca została wykonana w ramach działalności statutowej (umowa AGH nr 11.11.140.292) Katedry Hydrogeologii i Geologii Inżynierskiej oraz Katedry Mineralogii, Petrografii i Geochemii (umowa AGH nr 11.11.140.158) .

LITERATURA

Abramski K., 1992. Wykorzystanie odpadów produkcyjnych do wzmocnienia podłoża budowlanego. *Mat. Symp. „Krajowe doświadczenia wzmacniania podłoża"*, Gdańsk, 25–26 września 1992, 230–240.

Bahranowski K., Górniak K., Ratajczak T., Sikora W.S., Szydłak T. & Wyszomirski P., 1999. Wymywalność niektórych pierwiastków głównych i śladowych z zawiesiny wodnej popiołów lotnych. *Polskie Towarzystwo Mineralogiczne – Prace Specjalne*, 13, 9–35.

Brandštetr J., Havlica J. & Odler I., 1997. Properties and use of solid residue from fluidized bed coal combustion. W: Chandra S. (ed.), Waste Materials used in concrete manufacturing, 1–52, Noyes Publications, Westwood, New Jersey, USA.

Brylska E. & Gawlicki M., 2003. Właściwości popiołów lotnych powstających w nowych systemach spalania węgla. *Ceramika Budowlana*, 10–15.

Ciuk E., Doktor M., Kołcon I., Matl K., Rybicki S., Słomka T. & Wagner M., 1992. Litologia utworów trzeciorzędu w polskiej części niecki żytawskiej i ich własności fizykomechaniczne. *Prace Geologiczne,* 137, 103pp.

Enders M., 1995. Microanalytical characterization (AEM) of glassy spheres and anhydrite from a high-calcium lignite fly ash from Germany. *Cement and Concrete Research*, 25, 6, 1369–1377.

Fisher G.L., Prentice B.A., Silberman D., Ondov J.M., Bierman A.H., Ragaini R.C. & McFarland A.R., 1978. Physical and morphological studies of size-classified coal fly ash. *Environmental Science and Technology*, 12, 4, 447–451.

Gieré R., Carleton L.E. & Lumpkin G.R., 2003. Micro- and nanochemistry of fly ash from coal-fired power plant. *American Mineralogist*, 88, 1853–1865.

Goodarzi F., 2006. Characteristics and composition of fly ash from Canadian coal-fired power plants. *Fuel*, 85, 1418–1427.

Górniak K., Szydłak T., Bahranowski K., Gaweł A., Muszyński M. & Ratajczak T., 1999. Skład mineralny kopalin towarzyszących węglom oraz odpadów poflotacyjnych w aspekcie ich wykorzystania jako składników mieszanin popiołowo-mineralnych. *Polskie Towarzystwo Mineralogiczne – Prace Specjalne*, 13, 35–43.

Guorui G., 1991. Application of microstructure classification of marine sediment to engineering geological evaluation. W: Bennett R.H., Bryant W.R. & Hubert M.H. (eds), Microstructures of fine-grained sediments, from mud to shale, 531–537, Springer-Verlag, New York.

Halse Y., Pratt P.L., Dalziel J.A. & Gutterdge W.A., 1984. Development of microstructure and other properties in flyash OPC systems. *Cement and Concrete Research*, 14, 491–498.

Keller W.D., 1978. Classification of kaolins examplified by their textures in scan electron micrographs. *Clays Clay Minerals*, 26, 1–20.

Kozydra Z. & Wyrwicki R., 1970. *Surowce ilaste*. Wyd. Geol., Warszawa, 1–208.

Nishikawa J., Sato A. & Amano K., 2002. Utilization of coal ash as filling materials. *Proceedings of the 4th Interantional Congress on Environmental Geotechnics*, Rio de Janeiro, 615–618.

O'Brien N.R. & Slatt R.M., 1990. *Argillaceous rock atlas*. Springer-Verlag, New York, 1–141.

Paszyc-Stępkowska K., 1993. Application of fly ash to improve properties of a mud. *4th International Symposium on the Reclamation Treatment and Utilization of Coal Mining Wastes*, vol. 2, University of Agriculture in Kraków, 6–9 September, 595–600.

Powder Diffraction File PDF-2. International Centre for Diffraction Data. 1995.

Prietto P.D.M., Carraro J.A.H., Vendruscolo M.A. & Consoli N.C., 1998. Utilization of waste in the improvement of soil. *Proceedings of the 3rd International Congress on Environmental Geotechnics*, Lisbona, 157–162.

Puch K.H., 2001. Utilization of FBC ashes – applications, options, research. *Materiały VIII Międzynarodowej Konferencji „Popioły z energetyki"*, Międzyzdroje, 121–139.

Querol X., Fernandez Turiel L.J. & Soler L., 1994. The behaviour of mineral matter during combustion of Spanish subbituminous and brown coals. *Mineralogical Magazine*, 58, 119–133.

Ratajczak T., Gaweł A., Górniak K., Muszyński M., Szydłak T. & Wyszomirski P., 1999. Charakterystyka popiołów lotnych ze spalania niektórych węgli kamiennych i brunatnych. *Polskie Towarzystwo Mineralogiczne – Prace Specjalne*, 13, 5–9.

Rybicki S., Kaczmarczyk R. & Borecka A., 1999. Właściwości gruntu zwałowego z KWB Turów. *Górnictwo Odkrywkowe*, 4–5, 132–148.

Sava K., Tomohisa S. & Inazumi S., 1998. Utilization of industrial wastes as a hardening additive for muddy soil. *Proceedings of the 3rd International Congress on Environmental Geotechnics*, Lisbona, 691–696.

Sergeyev Y.M., Grabowska-Olszewska B., Osipov V.I., Sokolov V.N. & Kolomenski Y.N., 1980. The classification of microstructures of clay soils. *Journal of Microscopy*, 120, 3, 237–260.

Shenbaga R., Kaniraj S. & Vasant H., 1996. Fly ash and fly ash – soil mixture for embankment construction. *Proceedings of the 2nd Interanational Congress on Environmental Geotechnics*, Osaka, 757–762.

Stępisiewicz M., 1987. Studium mineralogiczne skał ilastych niecki turoszowskiej. *Archiwum Mineralogiczne*, XLII, 1, 109–205.

Szczepańska J., 2000. Ograniczenia transportu zanieczyszczeń ze składowisk odpadów górnictwa węglowego przez zmianę parametrów filtracyjnych. *Szkoła gospodarki odpadami*, Kraków – Rytro, IGSMiE PAN, 289–300.

Summary

In environmental engineering for an improvement of weak soils, the methods based among others on mixing of soils with different binding materials are used. To such materials belong also fly ashes from electric power station Turów that used lignite from open-pit Turów for the combustion process. The dump soils from the Turów open-pit (being a mixture of the Tertiary and Quaternary soils of the lignite deposits overburden), were mixed with three different types of the fly ashes: undesulfurized fly ash (PI), desulfurized fly ash from fluidized furnace (PII) and desulfurized fly ash from conventional furnace (PIII). The mixtures of the dump soils with different percentage of fly ash were stored for 28 days, at an optimum humidity, in order to proceeds the binding reactions.

For the samples of the soil-ash mixtures after binding processes some physical-mechanical properties were measured (Tab. 4) as well as phase and mineralogical composition (Tab. 2) and microstructure (Figs 14–16).

Similar studies were carried out on both components of mixtures – dump soil and of three ashes (PI, PII, PIII) used; classification of the ashes is presented on figure 1, their chemical composition in table 1, granular composition in table 3, phase and mineral composition in table 2, microstructures on figures 2–12. the results of the physical-mechanical parameters, mineralogical composition and microstructures of dump soils have been presented in tables 2, 4 and figure 13.

From the obtained results distinct increase of shear strength of soil-ash mixtures was observed, mainly due to increase of cohesion in comparison to the dump soils (Tab. 4); the highest increase was observed for the mixtures of dump soil with fly ash PII – generally for the additive of fly ash above 20% (Tab. 4). The observed increase of cohesion is the result of the bonds forming in the grain mixtures where microstructure matrix types connected with cement phases were formed.

Tabela (Table) 4

Wyniki badań parametrów oporu ścinania mieszanek popiołowo-gruntowych i samego gruntu zwałowego

Values of shear strength parameters of soil-ashes mixtures and dump soils A, B

Rodzaj i dodatek popiołu *Kind and percentage of ash* [%]	Mieszanka popiołu z gruntem zwałowiska zewnętrznego (A) *Mixture of ash and dump soil (A)*				Mieszanka popiołu z gruntem zwałowiska wewnętrznego (B) *Mixture of ash and dump soil (B)*			
	próbka *sample*	spójność *cohesion* [kPa]	kąt tarcia wewnętrznego *angle of internal friction* [°]	gęstość objętościowa *bulk density* [Mg/m^3]	próbka *sample*	spójność *cohesion* [kPa]	kąt tarcia wewnętrznego *angle of internal friction* [°]	gęstość objętościowa *bulk density* [Mg/m^3]
popiół nieodsiarczany (PI) *nonsulphurized ash (PI)*								
10	1	5.3	20.1	2.01	–	–	–	–
15	–	–	–	–	21	2.1	14.5	2.03
20	16	48.5	9.7	1.99	–	–	–	–
30	2	39.5	20.1	1.95	22	31.9	26.5	1.97
40	15	102.5	15.0	1.72	–	–	–	–
45	–	–	–	–	23	37.2	23.9	1.68
popiół odsiarczany (PII) *sulphurized ash (PII)*								
5	11	43.8	10.7	1.98	–	–	–	–
7.5	17	111.0	7.6	2.02	–	–	–	–
10	3	270.0	3.5	2.05	24	7.9	27.8	2.02
12.5	18	325.0	5.0	2.03	–	–	–	–
20	13	439.0	14.5	2.00	25	329.0	20.7	1.96
30	4	375.8	16.7	1.82	26	264.4	19.0	1.78
40	14	248.5	16.7	1.69	27	253.0	23.3	1.66
50	5	–	–	–	28	284.0	22.6	1.64
60	19	–	–	–	29	56.6	27.8	1.51
popiół odsiarczany (PIII) *sulphurized ash (PIII)*								
10	6	7.3	16.7	1.98	30	16.8	26.5	2.01
15	10	31.6	14.5	1.96	–	–	–	–
20	7	58.2	15.6	2.02	31	30.6	25.2	2.03
30	20	61.7	17.2	1.93	32	66.0	24.0	2.02
40	8	75.0	16.1	1.84	33	79.4	23.1	1.94
50	9	89.3	17.8	1.79	34	79.4	21.5	1.71
60	–	–	–	–	35	59.2	26.5	1.70
grunt zwałowy *dump soil*	A	22.0	21.3	1.90	–	–	–	–
grunt zwałowy *dump soil*	–	–	–	–	B	21.5	21.5	2.14

(–) nie badano *not tested*