

Franciszek PLEWA*, Marcin POPCZYK**, Piotr PIERZYNA**

Możliwości wykorzystania wybranych odpadów energetycznych z udziałem środka wiążącego do podsadzki zestalanej w podziemiu kopalń

STRESZCZENIE. Od wielu lat uboczne produkty spalania powstające w polskiej energetyce zawodowej są z powodzeniem wykorzystywane w wielu gałęziach przemysłowych jako dodatek lub po procesie odzysku jako produkt gotowy. Najpowszechniej UPS-y wykorzystywane są w budownictwie, drogownictwie oraz w technologiach górniczych. W górnictwie podziemnym obecnie powszechnie stosuje się drobnoziarniste odpady energetyczne (popioły lotne) do doszczelniania zrobów zawałowych w ramach prowadzonej profilaktyki pożarowej. Biorąc pod uwagę, że niektóre rodzaje odpadów energetycznych posiadają właściwości wiążące celowym jest poszukiwanie nowych miejsc ich zastosowania jako alternatywnych materiałów w stosunku do stosowanych obecnie. Takim przykładem jest stosowana w górnictwie technologia podsadzkowa, polegająca na wypełnianiu pustych wygrodzonych przestrzeni materiałem wypełniającym w celu ochrony powierzchni. Dominującą w tym zakresie jest technologia podsadzki hydraulicznej, bazująca na piasku podsadzkowym z dodatkiem innych materiałów – najczęściej skruszonego kamienia kopalnianego o uziarnieniu powyżej 0,1 mm. Alternatywą dla tej technologii jest technologia podsadzki zestalanej, bazująca głównie na materiałach o uziarnieniu poniżej 0,1 mm, w tym popiołach lotnych pochodzących z energetyki zawodowej oraz odpadach flotacyjnych. W niniejszym referacie przedstawiono wyniki badań właściwości fizykomechanicznych hydromieszanin na bazie popiołu lotnego o kodzie 10 01 02, piasku dennego z kotła fluidalnego o kodzie 10 01 24 oraz cementu. Udział cementu w mieszance popiołu i piasku wynosił 5, 10 lub 15%. Badania przeprowadzono zgodnie z metodyką opisaną w normie PN-G/11011:1998. Na podstawie przedstawionych wyników

* Prof. dr hab. inż., ** Dr inż. – Politechnika Śląska, Gliwice; e-mail: franciszek.plewa@polsl.pl, marcin.popczyk@polsl.pl, piotr.pierzyna@polsl.pl

badan właściwości fizykomechanicznych tych hydromieszanin należy stwierdzić że:

- rozlewność badanych mieszanin mieściła się w zakresie od 178 mm do 237 mm, a ich gęstość od 1,51 Mg/m³ do 1,72 Mg/m³,
- ilość wody nadosadowej zawierała się w przedziale od 6,6% do 13,9%,
- wytrzymałość na ściskanie po 28 dniach sezonowania wyniosła od 3,7 MPa do 6,2 MPa,
- rozmakalność wynosiła od 2,2% do 16,2%.

Uwzględniając wymagania normowe należy stwierdzić, że pełną przydatność do podsadzki zestalanej spełnia mieszanina wykonana na bazie mieszaniny o proporcjach popiołu fluidalnego do piasku dennego 75/25 z udziałem cementu w ilości 10 i 15%.

SŁOWA KLUCZOWE: górnictwo, podsadzka zestalana, odpady energetyczne

Wprowadzenie

Od wielu lat uboczne produkty spalania (UPS) powstające w polskiej energetyce zawodowej są z powodzeniem wykorzystywane w wielu gałęziach przemysłu jako dodatek lub po procesie odzysku jako produkt gotowy (Mazurkiewicz i in. 1997; Plewa, Mysiek 2001; Palarska i in 2012). Obecnie w Polsce UPS-y powszechnie wykorzystywane są w budownictwie i drogownictwie głównie do stabilizacji gruntów stosowanych w budowie nasypów oraz podbudowy dróg (Kołodziejczyk i in. 2012). Związane jest to z szerokim zakresem prowadzonych obecnie w naszym kraju prac budowlanych dróg i autostrad. Znaczącym odbiorcą UPS – szczególnie w miesiącach zimowych, gdy branża budowlana jest mniej aktywna – jest górnictwo podziemne węgla kamiennego, gdzie obecnie powszechnie stosuje się drobnoziarniste odpady energetyczne (popioły lotne) do doszczelniania zrobów zawałowych w ramach prowadzonej profilaktyki pożarowej. Biorąc pod uwagę, że niektóre rodzaje odpadów energetycznych posiadają właściwości wiążące celem jest poszukiwanie nowych miejsc ich zastosowania jako alternatywnych materiałów w stosunku do stosowanych obecnie (Plewa i in. 2011, 2012). W górnictwie podziemnym do ochrony powierzchni od dziesięcioleci z powodzeniem wykorzystywana jest powszechnie podsadzka hydrauliczna. Technologia ta wykorzystuje głównie piasek podsadzkowy pochodzący z kopalni odkrywkowych z możliwym dodatkiem gruboziarnistych odpadów kopalnianych (kamień) lub energetycznych (żużel). Wymagania normowe ze względów technologicznych wykluczają zastosowanie w podsadźce hydraulicznej drobnofrakcyjnych odpadów energetycznych, takich jak popioły lotne. Rozwiązaniem alternatywnym dla klasycznej podsadzki hydraulicznej, wykorzystującym popioły lotne pochodzące z energetyki, jest podsadzka zestalana. W polskim górnictwie węgla kamiennego podsadzka zestalana po raz pierwszy została zastosowana w kopalni „Jastrzębie” podczas eksploatacji pokładu 510/1-2. Budowa geologiczna i właściwości fizykomechaniczne grubego pokładu 510/1-2, a zwłaszcza bardzo mała zwięzłość węgla, wymagały zastosowania niekonwencjonalnych metod jego wybierania. Zastosowana receptura podsadzki zestalanej – opracowana specjalnie dla potrzeb kopalni „Jastrzębie” – była następująca: 40–50% popiołów lotnych,

50–60% odpadów flotacji oraz 2–3% cementu. Skład podsadzki zestalanej powinien być tak dobrany, aby zapewnione były podstawowe parametry wytrzymałościowe, a w szczególności krótki czas zestalania (1–2 dni) oraz określona w PN-G/11011:1998 wartość wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie wynosząca min. 0,5 MPa po 28 dniach. Wiele popiołów lotnych – szczególnie tych pochodzących z bloków energetycznych posiadających tzw. „suche” lub „półsuche” metody odsiarczania – charakteryzuje się właściwościami pucolanowymi. Jednak jak pokazuje wieloletnie doświadczenie, dla zapewnienia wymagań normowych dla podsadzki zestalanej niezbędny jest dodatek co najmniej kilku procent cementu (Plewa, Mysłek 2001; Palarska i in. 2012; Plewa, Popczyk, Mysłek 2007). Wymagany krótki czas zestalania w przypadku stosowania w polskim podziemnym górnictwie węgla kamiennego wynikający z zastosowanych systemów eksploatacyjnych wymagałby zastosowania dodatku nawet kilkunastu procent cementu, co w znacznym stopniu podwyższyłoby koszty eksploatacyjne. Dlatego też podsadzka zestalana w Polsce stosowana była w latach ubiegłych głównie w górnictwie rudnym, w którym zastosowane systemy eksploatacyjne komorowe i komorowo-filarowe pozwalały na wydłużenie czasu zestalania nawet do 28 dni (Mysłek i in. 2008).

Podsadzka zestalająca w porównaniu do podsadzki hydraulicznej posiada następujące zalety (Palarska i in. 2012):

- ✧ umożliwia wykorzystanie materiałów odpadowych,
- ✧ charakteryzuje się procesem wiązania bez oddawania wody nadmiarowej,
- ✧ pozwala na zmianę kolejności wybierania warstw pokładów grubych,
- ✧ umożliwia wykorzystanie jako wody zarobowej słonych wód kopalnianych.

Do wad podsadzki zestalanej w porównaniu do podsadzki hydraulicznej można zaliczyć (Palarska i in. 2012):

- ✧ niezbędny udział środków wiążących,
- ✧ bardziej skomplikowaną technologię wytwarzania mieszaniny podsadzkowej,
- ✧ konieczność dostosowania prędkości postępu ściany w zależności od właściwości zestalających podsadzki.

Odmianą podsadzki zestalanej jest podsadzka typu „pasta”, która charakteryzuje się wysoką koncentracją materiału ziarnistego. Podsadzka tego typu w Polsce nie była stosowana, natomiast jest wykorzystywana w światowym górnictwie rudnym. Pomimo swoich zalet, takich jak brak wody nadosadowej, wyższe parametry wytrzymałościowe i krótsze czasy wiązania (Yilmaz, Belem 2012) przy takim samym składzie suchych komponentów w porównaniu do podsadzki zestalanej, wymaga zastosowania innej infrastruktury podsadzkowej, w tym wysokociśnieniowych pomp tłoczących.

W referacie przedstawiono wyniki badań podstawowych właściwości fizykomechanicznych mieszanki odpadów energetycznych w postaci piasku dennego z kotła fluidalnego oraz popiołu lotnego, powstającego bez procesu odsiarczania z udziałem cementu pod kątem zastosowania w technologii podsadzki zestalanej.

1. Metodyka oraz zakres badań właściwości fizykomechanicznych

Do badań podstawowych właściwości fizykomechanicznych zastosowano hydromieszanki sporządzone z piasku pochodzącego ze złóż fluidalnych (10 01 24), popiołu lotnego bez produktów odsiarczania spalin (10 01 02) oraz cementu. Skład ziarnowy oraz skład chemiczny wykorzystanych do badań w/w odpadów energetycznych przedstawiono odpowiednio w tabelach 1 i 2.

TABELA 1. Skład ziarnowy wykorzystanych w badaniach odpadów energetycznych

TABLE 1. Particle size used in the study of energy waste

Uziarnienie	Wymiar otworów sita	Piasek ze złóż fluidalnych (10 01 24)		Popiół lotny bez produktów odsiarczania spalin (10 01 02)	
		masa materiału pozostającego na sicie	suma mas przechodzących przez sito	masa materiału pozostającego na sicie	suma mas przechodzących przez sito
mm	mm	%	%	%	%
8–16	8	0,00	100,00	0,00	100,00
4–8	4	2,01	97,99	0,00	100,00
2–4	2	4,26	93,73	0,00	100,00
1–2	1	7,78	85,95	0,00	100,00
0.5–1	0,5	12,38	73,57	0,00	100,00
0.250–0.5	0,25	23,54	50,03	0,50	99,50
0.125–0.250	0,1	40,36	9,67	5,60	93,90
0.063–0.125	0,063	7,20	2,47	11,20	82,70
0–0.063	materiał na denku	2,47	0,00	82,70	0,00

Do mieszaniny piasku i popiołu stanowiących składnik odpadowy mieszanin dodawano cement w ilości 5, 10 i 15% w stosunku do sumarycznej masy obu odpadowych komponentów. Mając na uwadze skład chemiczny stosowanych odpadów, w szczególności piasków fluidalnych, zawierających znaczne ilości siarczków i chlorków, zastosowano cement hutniczy (CEM III 42,5), charakteryzujący się spośród dostępnych powszechnie na rynku cementów wysoką odpornością na różnego rodzaju korozję (siarczanową, chlorkową oraz magnezową). Ilość dodawanej wody zarobowej określona wskaźnikiem wodno-spoiwowym

TABELA 2. Skład chemiczny wykorzystanych w badaniach odpadów energetycznych

TABLE 2. The chemical composition used in the study of energy waste

Oznaczenie	Piasek ze złóż fluidalnych (10 01 24)		Popiół lotny bez produktów odsiarczania spalin (10 01 02)	
	zawartość w przeliczeniu na 815°C	zawartość po przeliczeniu na stan wyjściowy	zawartość w przeliczeniu na 815°C	zawartość po przeliczeniu na stan wyjściowy
	% wag.	% wag.	% wag.	% wag.
SiO ₂	42,31	41,58	55,84	53,27
Al ₂ O ₃	16,48	16,19	24,28	23,16
Fe ₂ O ₃	3,02	2,97	6,05	5,77
CaO	16,27	15,99	3,70	3,53
MgO	2,61	2,56	2,40	2,29
Na ₂ O	0,87	0,85	1,20	1,14
K ₂ O	2,93	2,88	3,49	3,33
SO ₃	11,78	11,58	0,46	0,44
TiO ₂	0,48	0,47	1,13	1,08
P ₂ O ₅	2,56	2,52	0,70	0,67
Straty prażenia	–	1,73	–	4,61
Suma	99,31	99,32	99,25	99,29

(W/S) dla wszystkich mieszanin była stała i wynosiła 0,5, tj. na 1000 g suchej masy piaskowo-popiołowo-cementowej przypadało 500 g wody.

Badania laboratoryjne przeprowadzono w laboratorium Instytutu Eksploatacji Złóż zgodnie z normą PN-G-11011. Badania obejmowały pomiary podstawowych parametrów, takich jak: rozlewność, gęstość, ilość wody nadosadowej, wytrzymałość na jednoosiowe ściskanie oraz rozmakalność.

Celem odwzorowania typowych warunków klimatycznych występujących w wyrobiskach podziemnych kopalń wykonane próbki mieszanin sezonowano w komorze klimatycznej LTB 650 RV produkcji firmy Elbanton, Holandia. Warunki sezonowania w komorze były następujące: temperatura 25°C, wilgotność 90%. Składy badanych hydromieszanin przedstawiono w tabeli 1.

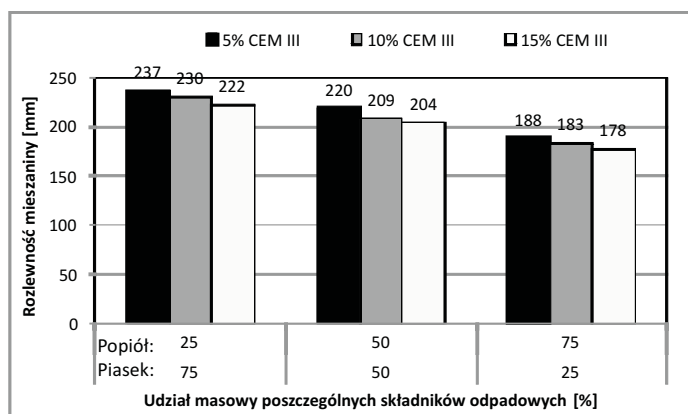
TABELA 3. Udziały masowe składników badanych hydromieszanin

TABLE 3. Composition by mass of hydraulic mixtures

Lp.	Udział masowy piasku fluidalnego i popiołu lotnego stanowiących składnik odpadowy mieszanin [%]		Ilość cementu CEM III 42,5 przypadająca na całkowitą masę składnika odpadowego (piasek i popiół) [%]
	piasek ze złóż fluidalnych (10 01 24)	popiół lotny (10 01 02)	
1	25	75	5
2	50	50	
3	75	25	
4	25	75	10
5	50	50	
6	75	25	
7	25	75	15
8	50	50	
9	75	25	

2. Wyniki badań rozlewności

Wyniki badań rozlewności mieszanin piasku fluidalnego i popiołu lotnego z udziałem cementu CEM III 42,5 o wskaźniku W/S wynoszącym 0,5 przedstawiono na rysunku 1.



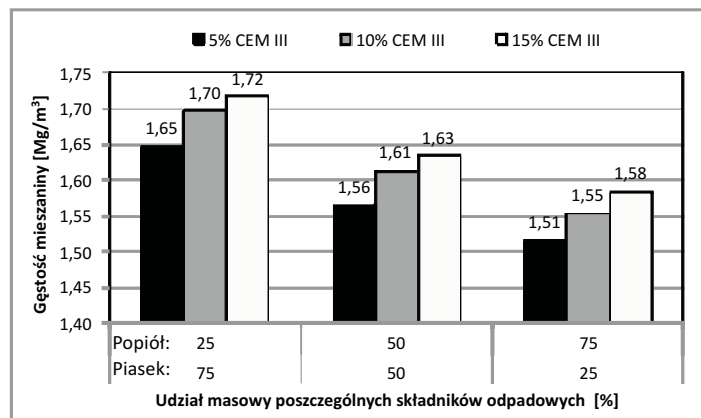
Rys. 1. Wyniki badań rozlewności mieszanin piasku ze złoża fluidalnego i popiołu lotnego z dodatkiem cementu o wskaźniku W/S wynoszącym 0,5

Fig. 1. Spread test results of mixtures containing the sand from fluidal bed and fly ash with cement by the W/S index equal to 0.5

Badane mieszanki charakteryzują się rozlewnością w zakresie od 167 mm do 237 mm. Najmniejszą rozlewnością w zakresie od 178 do 188 mm cechują się mieszanki o składzie 75% popiołu i 25% piasku dennego. Największą rozlewnością charakteryzują się mieszanki zawierające 75% piasku fluidalnego i 25% popiołu. Rozlewność ich waha się w zależności od udziału cementu w przedziale od 222 do 237 mm. Przeprowadzone badania pozwalają stwierdzić, że wraz ze wzrostem udziału w mieszaninie popiołu w stosunku do piasku fluidalnego (z 25 do 75%), rozlewność mieszanin niezależnie od ilości cementu maleje o około 20%. Podyktowane to jest mniejszą wodorzędnością piasku fluidalnego w porównaniu do popiołu lotnego. Analizując wpływ dodawanego cementu w zakresie 5–15% dla stałej proporcji składników odpadowych (popiół do piasku) na rozlewność należy stwierdzić, że jest on niewielki i nieznacznie uzależniony od proporcji składników odpadowych. Wzrost udziału cementu w mieszaninie o takich samych proporcjach piasek/popiół powoduje niewielki spadek rozlewności o około 5–7%.

3. Wyniki badań gęstości

Wyniki badań gęstości mieszanin piasku fluidalnego i popiołu lotnego z udziałem cementu CEM III 42,5 o wskaźniku W/S wynoszącym 0,5 przedstawiono na rysunku 2.



Rys. 2. Wyniki badań gęstości mieszanin piasku ze złoża fluidalnego i popiołu lotnego z dodatkiem cementu o wskaźniku W/S wynoszącym 0,5

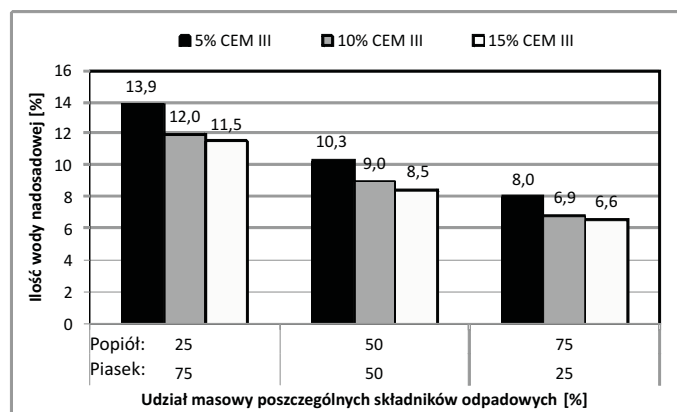
Fig. 2. Density measurement results of mixtures containing the sand from fluidal bed and fly ash with cement by the W/S index equal to 0.5

Badane mieszanki charakteryzują się gęstością w zakresie od 1,51 Mg/m³ do 1,72 Mg/m³. Największą gęstością charakteryzują się mieszanki zawierające 75% piasku fluidalnego oraz 25% popiołu. Rozlewność ich waha się w zależności od udziału cementu w zakresie 1,65 do 1,72 Mg/m³. Najmniejszą gęstością cechują się mieszanki zawierające 75% po-

piołu i 25% piasku. Gęstość ich w zależności od udziału cementu zawiera się przedziale się od 1,51 do 1,58 Mg/m³. Przeprowadzone badania pozwalają stwierdzić, że wraz ze wzrostem udziału w mieszaninie popiołu w stosunku do piasku fluidalnego (z 25 do 75%), gęstość mieszanin niezależnie od ilości cementu nieznacznie maleje o około 10%. Analizując wpływ dodawanego cementu w zakresie 5–15% dla takiej samej proporcji składników odpadowych (popiół do piasku) na gęstość należy stwierdzić, że jest on niewielki. Wzrost udziału cementu w mieszaninie o takich samych proporcjach piasek/popiół powoduje niewielki spadek gęstości o około 4–5%.

4. Wyniki badań ilości wody nadosadowej

Wyniki badań ilości wody nadosadowej mieszanin piasku fluidalnego i popiołu lotnego z udziałem cementu CEM III 42,5 o wskaźniku W/S wynoszącym 0,5 przedstawiono na rysunku 3.



Rys. 3. Wyniki badań ilości wody nadosadowej mieszanin piasku ze złoża fluidalnego i popiołu lotnego z dodatkiem cementu o wskaźniku W/S wynoszącym 0,5

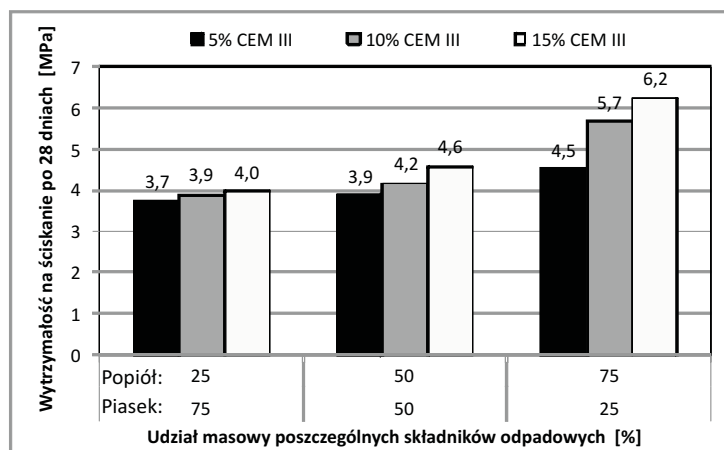
Fig. 3. Excessive water content measurement results of mixtures containing the sand from fluidal bed and fly ash with cement by the W/S index equal to 0.5

Badane mieszaniny charakteryzują się ilością wody nadosadowej w zakresie od 6,6 do 13,9%. Najmniejszą ilością wody nadosadowej cechują się mieszaniny wytworzone na bazie mieszaniny popiołu i piasku w proporcjach 75/25. Ilość wody nadosadowej dla tych mieszanin waha się w zależności od udziału cementu od 6,6 do 8%. Największą ilością wody nadosadowej charakteryzują się mieszaniny zawierające 75% piasku fluidalnego oraz 25% popiołu. Ilość wody nadosadowej zawiera się w zależności od ilości cementu w zakresie od 13,9 do 11,5%. Przeprowadzone badania pozwalają stwierdzić, że wraz ze wzrostem udziału w mieszaninie popiołu w stosunku do piasku fluidalnego (z 25 do 75%), ilość wody

nadosadowej w mieszaninach niezależnie od ilości cementu maleje o około 40%. Tak jak w przypadku rozlewności wynika to z mniejszej wodorzędności piasku fluidalnego w porównaniu do popiołu lotnego. Wraz ze zmianą udziału cementu od 5 do 15% w mieszaninie dla takiej samej proporcji składników odpadowych (popiół do piasku) ilość wody nadosadowej maleje o około 17%.

5. Wyniki badań wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie

Wyniki badań wytrzymałości na ściskanie mieszanin piasku fluidalnego i popiołu lotnego z udziałem cementu CEM III 42,5 o wskaźniku W/S wynoszącym 0,5 przedstawiono na rysunku 4.



Rys. 4. Wyniki badań wytrzymałości na ściskanie mieszanin piasku ze złoża fluidalnego i popiołu lotnego (10 01 02) z dodatkiem cementu o wskaźniku W/S wynoszącym 0,5

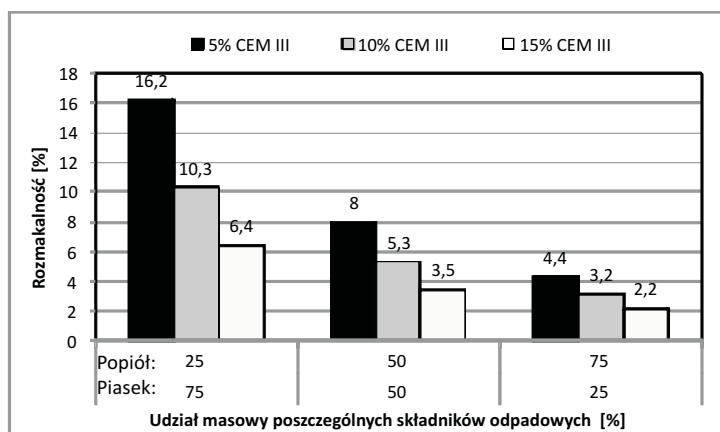
Fig. 4. Compressive strength measurement results of mixtures containing the sand from fluidal bed and fly ash (10 01 02) with cement by the W/S index equal to 0.5

Badane mieszaniny charakteryzują się wytrzymałością na ściskanie po 28 dniach sezonowania w komorze klimatycznej w zakresie od 3,7 do 6,2 MPa. Najmniejszą wytrzymałością na ściskanie cechują się mieszaniny wytworzone na bazie mieszanki odpadowej o proporcjach popiołu do piasku dennego 25/75. Wytrzymałość tych mieszanin na ściskanie waha się w zależności od udziału cementu od 3,7 do 4,0 MPa. Najwyższymi wytrzymałościami na ściskanie, zawierającymi się w przedziale od 4,5 do 6,2 MPa, charakteryzują się mieszaniny zawierające 75% popiołu oraz 25% piasku fluidalnego. Przeprowadzone badania pozwalają stwierdzić, że wzrost udziału popiołu w stosunku do piasku fluidalnego z 25 do 75% powoduje wzrost wytrzymałości na ściskanie o około 22% dla udziału 5% cementu, o około 46% dla udziału 10% cementu i o około 55% dla udziału 15% cementu.

Analizując wpływ wzrostu dodawanego cementu w zakresie 5–15% dla takiej samej proporcji składników odpadowych (popiół do piasku) na wytrzymałość na ściskanie należy stwierdzić, że powoduje on wzrost wartości omawianego parametru. Wielkość wzrostu wytrzymałości na ściskanie powodowana zwiększaniem udziału cementu w mieszaninie uzależniona jest mocno od wzajemnego udziału składników odpadowych. Dla mieszaniny 75% piasku i 25% popiołu wzrost udziału cementu z 5 do 15% powoduje wzrost wytrzymałości o około 8%, a w przypadku odwrotnym tj. dla 25% piasku i 75% popiołu przyrost wytrzymałości wynosi już 38%.

6. Wyniki badań rozmakalności

Wyniki badań rozmakalności mieszanin piasku fluidalnego i popiołu lotnego z udziałem cementu CEM III 42,5 o wskaźniku W/S wynoszącym 0,5 przedstawiono na rysunku 5.



Rys. 5. Wyniki badań rozmakalności mieszanin piasku ze złoza fluidalnego i popiołu lotnego (100102) z dodatkiem cementu o wskaźniku W/S wynoszącym 0,5

Fig. 5. Soak resistance measurement results of mixtures containing the sand from fluidal bed and fly ash (100102) with cement by the W/S index equal to 0.5

Badane mieszaniny charakteryzują się rozmakalnością w zakresie od 2,2 do 16,2%. Najmniejszą rozmakalnością charakteryzują się mieszaniny zawierające 75% popiołu oraz 25% piasku fluidalnego, a więc te, które osiągnęły najwyższe wytrzymałości na ściskanie. Ich rozmakalność waha się w zależności od ilości dodawanego cementu w zakresie od 4,4 do 2,2%. Największą rozmakalność osiągają mieszaniny zawierające 75% piasku fluidalnego i 25% popiołu. Kształtuje się ona w zależności od ilości dodanego cementu w zakresie od 16,2 do 6,4%. Przeprowadzone badania pozwalają stwierdzić, że wzrost udziału popiołu w stosunku do piasku fluidalnego z 25 do 75% powoduje średnio zmniejszenie rozmakal-

ności mieszanin o około 70%. Analizując wpływ wzrostu udziału dodawanego cementu w zakresie 5–15% do takiej samej proporcji składników odpadowych (popiół do piasku) na rozmakalność należy stwierdzić, że powoduje on spadek wartości omawianego parametru. Wielkość spadku wartości rozmakalności powodowana zwiększaniem udziału cementu w mieszaninie uzależniona jest od wzajemnego udziału składników odpadowych. Dla mieszanin 75% piasku i 25% popiołu wzrost udziału cementu z 5 do 15% powoduje spadek rozmakalności o około 60%, a w przypadku odwrotnym tj. dla 25% piasku i 75% popiołu spadek rozmakalności wynosi 50%.

Podsumowanie i wnioski końcowe

W referacie zaprezentowano możliwości wykorzystania odpadów energetycznych w postaci piasku ze złóż fluidalnych (10 01 24) oraz popiołu lotnego bez produktów odsiarczania spalin (10 10 02), do których dodawano cement hutniczy CEM III 42,5 w technologii górniczej podsadzki zestalanej z uwzględnieniem wymagań normy PN-G 11011:1998 „Materiały do podsadzki zestalanej i doszczelniania zrobów – Wymagania i badania”. Cement dodawany był do składników odpadowych mieszaniny (popiół+piasek) w ilości 5, 10 lub 15%. Ilość wody zarobowej określona wskaźnikiem wodno-spoiwowym W/S została ustalona dla wszystkich mieszanin na takim samym poziomie i wynosiła 0,5. Na podstawie przeprowadzonych badań wybranych właściwości fizykomechanicznych należy stwierdzić że:

- ✧ rozlewność badanych mieszanin mieściła się w zakresie od 178 mm do 237 mm, a ich gęstość od 1,51 Mg/m³ do 1,72 Mg/m³;
- ✧ ilość wody nadosadowej zawierała się w przedziale od 6,6% do 13,9%;
- ✧ wytrzymałość na ściskanie po 28 dniach sezonowania wyniosła od 3,7 MPa do 6,2 MPa, a rozmakalność od 2,2% do 16,2%.

Wyniki badań wybranych właściwości fizykomechanicznych w odniesieniu do wymagań normy PN-G 11011:1998 przedstawiono w tabeli 2.

Przeprowadzone badania pozwalają stwierdzić, że wraz ze wzrostem udziału popiołu w mieszaninie w stosunku do piasku fluidalnego (z 25 do 75%), niezależnie od ilości cementu:

- ✧ rozlewność mieszanin maleje o około 20%,
- ✧ gęstość mieszanin maleje o około 10%,
- ✧ ilość wody nadosadowej maleje około 40%.

W przypadku wytrzymałości na ściskanie można stwierdzić, że wzrost udziału popiołu w stosunku do piasku fluidalnego z 25 do 75% powoduje jej wzrost w zależności od udziału cementu od 22% do 55%. Rozpatrując rozmakalność można stwierdzić, że wzrost udziału popiołu w stosunku do piasku fluidalnego z 25 do 75% powoduje jej spadek niezależnie od udziału cementu o około 70%. Analizując wpływ wzrostu ilości dodawanego cementu z 5 do 15% dla danej proporcji składników odpadowych (popiół do piasku) należy stwierdzić, że powoduje:

TABELA 4. Wyniki badań wybranych właściwości fizykomechanicznych w odniesieniu do wymagań normy PN-G 11011:1998

TABLE 4. Results of measurements of selected physical-mechanical properties of the mixtures with a reference to PN-G 11011:1998 standard requirements

Lp.	Kryteria wg normy PN-G-11011:1998	Mieszanina spełniająca kryteria normy stosowania do podszadzki zestalanej
1	Rozlewność: ≥ 90 mm	każda badana mieszanina
2	Gęstość: $\geq 1,2$ Mg/m ³	każda badana mieszanina
3	Ilość wody nadosadowej: $\leq 7\%$	mieszaniny piasku fluidalnego w ilości 25% i popiołu lotnego w ilości 75% z dodatkiem cementu w ilości $\geq 10\%$
4	Wytrzymałość po 28 dniach: $\geq 0,5$ MPa	każda badana mieszanina
5	Rozmakałość: $\leq 20\%$	każda badana mieszanina

- ✧ spadek rozlewności o około 5–7%,
- ✧ spadek gęstości o około 4–5%,
- ✧ spadek ilość wody nadosadowej o około 17%,
- ✧ wzrost wytrzymałości na ściskanie w zależności od składu (wzajemnej proporcji piasku i popiołu) od 8 do 38%,
- ✧ spadek rozmakałości w zależności od składu (wzajemnej proporcji piasku i popiołu) od 60 do 50%.

Literatura

- MAZURKIEWICZ M, PIOTROWSKI Z., TAJDUŚ T., 1997 – Lokowanie odpadów w kopalniach podziemnych. Biblioteka Szkoły Eksploatacji Podziemnej, Kraków.
- PLEWA F., MYSŁEK Z., 2001 – Zagospodarowanie odpadów przemysłowych w podziemnych technologiach górniczych. Monografia, wyd. Politechniki Śląskiej, Gliwice.
- PALARSKI J., PLEWA F., MYSŁEK Z., 2012 – Odzysk i unieszkodliwianie odpadów w górnictwie podziemnym. Monografia, Wyd. Politechniki Śląskiej, Gliwice.
- PLEWA F., POPCZYK M., MYSŁEK Z., 2007 – Rodzaj produktów wytwarzanych w energetyce zawodowej i możliwości ich wykorzystania w podziemnych technologiach górniczych. Polityka Energetyczna t. 10, Wyd. IGSMiE PAN, Kraków.
- PLEWA F., POPCZYK M., PIERZYNA P., ZAJĄC A., 2011 – Wykorzystanie materiałów z udziałem odpadów energetycznych do likwidacji zapadlisk wywołanych działalnością górniczą. Polityka Energetyczna t. 14, z. 2, Wyd. IGSMiE PAN, Kraków.
- PLEWA F., POPCZYK M., PIERZYNA P., ZAJĄC A., 2012 – Analiza możliwości wykorzystania odpadu energetycznego z mokrego odsiarczania spalin (10 01 05) w mieszaninach zestalających w kopalniach węgla kamiennego. XXVI konferencja Zagadnienia surowców energetycznych i energii w gospodarce krajowej. 14–17 października, Zakopane. Polityka Energetyczna t. 15, z. 3, Wyd. IGSMiE PAN, Kraków.

- MYSŁEK Z., PALARSKI J., PLEWA F., POPCZYK M., 2008 – Flotation tailings based backfill technology with mobile slurry preparation plant for a zinc-lead mine. 14th International Conference on Transport And Sedimentation Of Solid Particles, 23–27 June, Saint Petersburg, Russia.
- KOŁODZIEJCZYK U., ĆWIAKAŁA M., WIDUCH A., 2012 – Zastosowanie popiołów lotnych do produkcji spoiw hydraulicznych i wzmacniania gruntu. *Gospodarka Surowcami Mineralnymi* t. 28, z. 4.
- YILMAZ E., BELEM T., BENZAAZOUA M., 2012 – Parametry jednowymiarowej konsolidacji podsadzki w postaci cementowej pasty. *Gospodarka Surowcami Mineralnymi* t. 28, z. 4, 20.

Franciszek PLEWA, Marcin POPCZYK, Piotr PIERZYNA

Application of selected power generation waste with an admixture of binder in solidifying backfill for underground mining

Abstract

For many years, coal combustion by-products from Polish professional power generation sites (CCB) have been successfully applied in many industries as a material component, or after re-cycling as a ready-made product. Most frequently, CCBs are used in building and road construction engineering, as well as in mining technologies. Currently in underground mining, finely grained power generation waste (fly ash) is commonly used for grouting of cavings as a fire retardant. Taking into consideration that some CCBs possess binding properties, it seems necessary to search for new fields of their application as alternatives to the materials already in use. As an example of this approach, technology for solidifying backfill should be mentioned, consisting of the filling of empty, separated voids with materials in order to protect the ground surface above. Within this field, the dominant application is the technology of hydraulic backfill, where generally sand is applied, sometimes with other materials – most frequently crushed waste rock of a grain size above 0.1 mm. Alternatively, solidifying backfill could be adopted, which mainly employs materials of a grain size below 0.1 mm, including fly ashes from power generation waste and flotation tailings. This paper presents the results of research on the physical-mechanical properties of mixtures being made on the basis of a fly ash with the code number 10 01 02, and sand which represents bottom residue from a fluidal vessel with code number 10 01 24. In order to achieve shorter binding times and higher compressive strength R_c , Portland cement in amounts of 5, 10, and 15% has been added to the mixture. Laboratory tests were conducted according to the standard PN-G/11011:1998. On the basis of the conducted research on the physical-mechanical properties of these mixtures, it should be concluded that:

- The spread test result value maintains a range from 178 mm to 237 mm, with the density of the mixture in the range from 1.51 Mg/m³ to 1.72 Mg/m³.
- Excess water amount is between 6.6% and 13.9%.

- Compressive strength after 28 days of cure is between 3.7 MPa and 6.2 MPa.
- Soak resistance is from 2.2% to 16.2%.

Considering the requirements of the standard, it should be concluded that a mixture fully applicable for solidifying backfill is prepared of 75% fluidal bed ash, 25% bottom sand, with an addition of 10% cement.

KEY WORDS: mining, solidifying backfill, power generation waste