

Andrzej RUDZIŃSKI, Jolanta HARASYMIUK

¹Uniwersytet Warmińsko-Mazurski w Olsztynie, Wydział Geodezji, Inżynierii Przestrzennej i Budownictwa, Instytut Budownictwa
ul. Heweliusza 4, 10-724 Olsztyn
e-mail: andrzej.rudzinski@uwm.edu.pl, jolanta.harasymiuk@uwm.edu.pl

Badania możliwości wykorzystania popiołów krzemionkowych z wieloletniej hałdy do produkcji drobnoziarnistych mieszanek stosowanych w budownictwie drogowym

Celem pracy było zbadanie możliwości zastosowania popiołów z wieloletniej hałdy jako składnika drobnoziarnistych mieszanek przeznaczonych do wykorzystania w budownictwie drogowym. Dzięki przeprowadzonym badaniom popioły z hałdy mogą przestać być traktowane jako kłopotliwy odpad przemysłowy degradujący środowisko naturalne i stać się pożądanym surowcem w drogownictwie, stosowanym m.in. do budowy nasypów drogowych, ich uszlachetniania i stabilizacji oraz wykonywania podbudów drogowych. W badaniach przygotowano 4 serie prób, w których popiołami z hałdy zastąpiono 10, 20, 30 i 35% masy piasku. Mieszanki z popiołami modyfikowano dodatkiem wapna hydratyzowanego w ilości 6% masy popiołu. Seria kontrolna była bez popiołu i wapna. Masa użytego cementu w suchych mieszankach z popiołami była niewielka i wyniosła 7,7%. Zbadano podstawowe właściwości techniczne prób mieszanek 28- i 90- dniowych. Mieszanki z popiołami w stosunku do serii prób bez popiołu uzyskały wzrosty wytrzymałości na ściskanie ponad 400%, a wytrzymałości na zginanie w większości serii powyżej 600%. Uzyskane wyniki badań sugerują możliwość zastosowania popiołów z hałdy do modyfikacji mieszanek z popiołami stosowanych w drogownictwie. Ograniczy to w znacznym stopniu uciążliwość popiołów dla środowiska.

Słowa kluczowe: popiół lotny krzemionkowy (ups), hałda, drobnoziarnista mieszanka z popiołami, wapno hydratyzowane

Wprowadzenie

Budowa dróg to niezbędny element rozwoju inwestycyjnego każdego kraju. Wiąże się on jednak z eksploatacją zasobów środowiskowych, w tym kruszyw budowlanych. Według szacunków Polskiego Stowarzyszenia Producentów Kruszyw Budowlanych, wyspecyfikowany zakres robót budowlanych dla dróg krajowych do 2020 roku (dotyczący autostrad i dróg ekspresowych) wskazuje na zapotrzebowanie na ten surowiec na poziomie 11÷15 mln ton rocznie [1]. Niedobór kruszyw naturalnych w niektórych rejonach Polski oraz nieodnawialność tego zasobu środowiskowego skłania do rozważenia możliwości wykorzystania odpadów przemysłowych jako ich zamiennika [2].

W literaturze przedmiotu wielokrotnie były prezentowane prace dotyczące różnych możliwości wykorzystania popiołów. Popiół w betonach i zaprawach był

i jest głównie stosowany jako zamiennik cementu i piasku [2-7]. Dotyczy to jednak głównie popiołów pobieranych z elektrofiltrów. Należy mieć na uwadze, że przez dziesiątki lat popioły były lokowane na składowiskach, zajmując cenne tereny, niszcząc okoliczny krajobraz oraz zanieczyszczając środowisko. Istnieje więc uzasadniona potrzeba realizacji działań mających na celu próbę zagospodarowania popiołów z hałd.

Celem pracy było zbadanie możliwości zastosowania popiołów z wieloletniej hałdy, pochodzących z kotłów pyłowych, jako składnika drobnoziarnistych mieszanek przeznaczonych do wykorzystania w budownictwie drogowym. Przygotowano serie prób o składzie jakościowym i ilościowym innym od składu mieszanek określonych w PN-EN 14227-3:2007 (załącznik B) [8]. W mieszankach badanych w niniejszej pracy zastosowano 7,7% cementu oraz duże ilości od 9,2 do 32,3% popiołu krzemionkowego z wieloletniej hałdy. W celu aktywacji reakcji pucolanowej dodano wapno hydratyzowane. Przykład takiego składu nie jest podany w ww. normie.

Wskaźnik aktywności pucolanowej oraz zawartość niespalonego węgla to istotne cechy popiołów, decydujące o ich przydatności w budownictwie. Właściwości fizykochemiczne popiołu zależą od rodzaju spalanego węgla, warunków spalania i rodzaju urządzeń do usuwania pyłów ze spalin. Właściwości te mogą być różne nawet w przypadku tego samego węgla [9, 10].

1. Badania

Do badań zastosowano następujące materiały wyjściowe:

- piasek naturalny o uziarnieniu $0 \div 2$ i zawartości: 93% kwarcu, ze śladowymi ilościami opalu i chalcedonu, 4% skał osadowych i węglanowych, 3% skał magmowych i metamorficznych oraz o stopniu potencjalnej reaktywności alkalicznej równym „0”,
- popiół lotny krzemionkowy z wieloletniej hałdy, pochodzący z kotłów pyłowych, o zawartości węgla 12,2%, składzie jakościowym i ilościowym określonym w tabeli 1, aktywności pucolanowej po 78 dniach - 74,4%, a po 90 dniach - 83,7% oraz składzie ziarnowym jak na rysunku 1,
- cement portlandzki CEM I 32,5 R,
- cement portlandzki CEM I 42,5, zawierający C_3A - 8,2%, alkalia Na_2O_{eq} - 0,81%, o powierzchni właściwej wg Blaine'a - 3400 cm^2/g ,
- wodorotlenek wapnia.

Próbki popiołów lotnych pobrano z wieloletniej hałdy zlokalizowanej przy jednym z większych zakładów przemysłowych województwa warmińsko-mazurskiego z głębokości 0,5 i 1,5 m. Przed przystąpieniem do badań próbki wysuszone. Popioły były częściowo zbrylone. Po ich wysuszeniu do stałej masy popioły przesiano przez sito o boku oczka kwadratowego 1 mm. Na podstawie rysunku 1 można stwierdzić, że uziarnienie popiołów pobranych z dwóch głębokości praktycznie się różniło. W celu przeprowadzenia badań obydwie popioły zmieszano. Z ry-

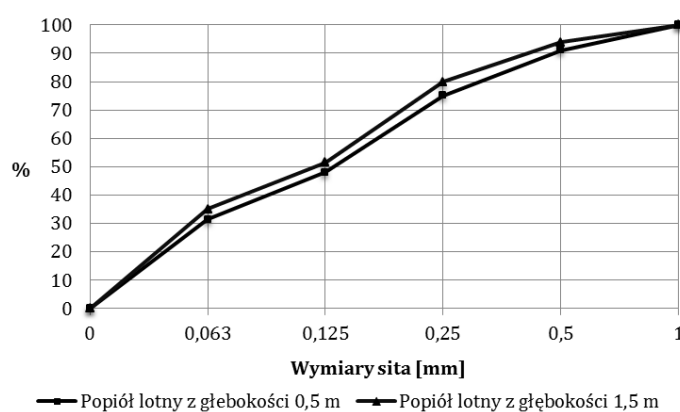
sunku 2 widać, że ziarna badanego popiołu miały różną wielkość. Kształt większości ziaren był kulisty, a ich powierzchnie gładkie.

Tabela 1. Skład tlenkowy popiołu stanowiącego przedmiot badań

Table 1. The qualitative and quantitative composition of examined ashes

Lp.	Tlenek	Zawartość, %
1	SiO ₂	40,46
2	Al ₂ O ₃	25,00
3	Fe ₂ O ₃	10,21
4	CaO	9,81
5	MgO	2,44
6	SO ₃	0,25
7	K ₂ O	0,26
8	Na ₂ O	0,49
9	P ₂ O ₅	0,21
10	TiO ₂	1,21
11	MnO	0,15
12	SrO	0,04
13	Suma	90,53

Źródło: opracowanie własne



Rys. 1. Krzywa przesiewu popiołów lotnych pobranych z hałdy z głębokości 0,5 i 1,5 m

Fig. 1. The curve of the sifting of fly ashes taken from a waste-dump from the depth of 0.5 and 1.5 m

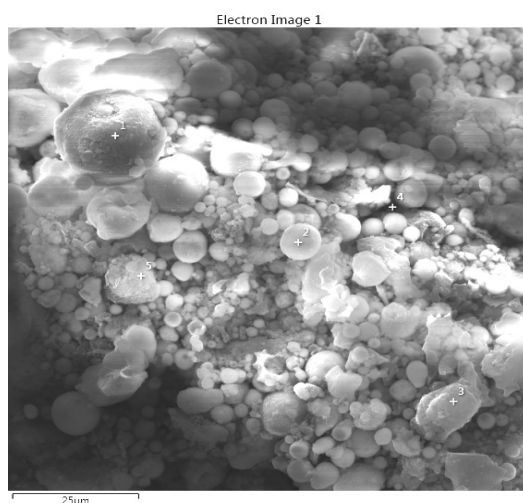
Źródło: opracowanie własne

W użytym do badań popiele z hałdy oznaczono wskaźnik aktywności pucolanowej zgodnie z wymaganiami norm PN-EN 450-1:2012 [9] i PN-EN 196-1:2006 [10].

Dla porównania wpływu jakości piasku na wskaźnik aktywności pucolanowej przygotowano serie próbek o takim samym składzie ilościowym, z tym że piasek kwarcowy zastąpiono piaskiem naturalnym 0÷2. Zbadano wytrzymałość na ściska-

nie prób 28- i 90-dniowych wykonanych z piasku normowego i cementu CEM I 42,5. Zbadano również wytrzymałość prób 28- i 90-dniowych o tym, samym składzie ilościowym, ale wykonanych z piasku naturalnego 0÷2. Dodatkowo na próbkach 28-dniowych wykonano badania nasiąkliwości i gęstości. Wyniki badań wybranych właściwości technicznych popiołów z hałdy przedstawiono w tabeli 2.

Przygotowano 4 serie drobnoziarnistych mieszanek z popiołem oznaczonych symbolami „1”, „2”, „3” i „3,5”, w których jako składnika mieszanek użyto popiołu z hałdy w ilości 10, 20, 30 i 35% masy piasku. W serii kontrolnej (porównawczej) - bez popiołu, oznaczonej symbolem „0” zmniejszono o 75% masę cementu w stosunku do zaprawy normowej (zamiast 450 użyto 112,5 g cementu).



Rys. 2. Obraz mikroskopowy badanego popiołu lotnego z wieloletniej hałdy wykonany przy użyciu elektronowego mikroskopu skaningowego Vega 3 firmy Tescan

Fig. 2. The view of the fly ashes under examination from a many years' waste-dump made with the help of an electron scanning microscope Vega 3 Tescan

Źródło: opracowanie własne

Tabela 2. Właściwości techniczne mieszanek piaskowo-popiołowo-cementowych

Table 2. The technical properties of sand-ash-cement mixtures

Seria	Wytrzymałość, MPa				Nasiąkliwość %	Gęstość kg/m ³
	zginanie		ściskanie			
	28 dni	90 dni	28 dni	90 dni		
0	0,16	0,21	1,73	2,32	11,6	1808
1	1,05	2,34	7,41	9,65	12,7	1839
2	1,42	2,26	7,28	10,41	13,9	1794
3	1,74	3,14	8,54	11,74	15,2	1712
3,5	2,02	3,23	8,92	13,95	17,5	1670

Źródło: opracowanie własne

Tabela 3. Skład ilościowy świeżych zarobów mieszanek z popiołami z hałdy

Table 3. The amount composition of the fresh batch of mixtures with ashes from a waste-dump

Seria	Piasek	Popiół	w/c	Woda	Wapno hydratyzowane
	g		-	cm ³	g
0	1350	-	1,91	2,15	-
1	1215	135	1,93	2,17	8,1
2	1080	270	1,97	2,22	16,2
3	945	405	2,12	2,38	24,3
3,5	878	473	2,32	2,61	28,4

* masa cementu CEM 32,5 we wszystkich seriach – 112,5 g

Źródło: opracowanie własne

Masa piasku w serii „0” wynosiła 1350 g, a wodę w tej i innych seriach dobierano doświadczalnie do uzyskania wymaganej urabialności, niezbędnej do zagęszczenia (konsystencja gęstoplastyczna). Mieszanki modyfikowano dodatkiem wapna hydratyzowanego w ilości 6% masy dodanego popiołu. Wapno rozprowadzano każdorazowo w 175 cm³ wody, a następnie wodę dodawano niewielkimi porcjami aż do uzyskania wymaganej, stałej urabialności. Składniki poszczególnych serii mieszanek w ilościach zawartych w tabeli 2 mieszano w mieszarce do zapraw normowych. Świeże mieszanki przenoszono do form trójdzielnych i zagęszczano w dwóch warstwach, tak jak przy badaniu klasy cementu wg PN-EN 196-1:2006 [11]. Do momentu badania próbki umieszczono w pojemnikach o wilgotności względnej powyżej 95% i temperaturze 20 ±2°C.

2. Omówienie wyników

Popiół lotny to sztuczna pucolana, która powstaje w wyniku spalania rozdrobnionego węgla w kotłach pyłowych. Pucolany nie twardnieją samodzielnie po zmieszaniu z wodą, lecz drobno zmielone w obecności wody reagują w temperaturze otoczenia z wodorotlenkiem wapnia, tworząc mieszaninę krzemianów wapnia i glinokrzemianów o rosnącej wytrzymałości [11, 12].

Wskaźnik aktywności pucolanowej jest istotną właściwością popiołów. Dane o aktywności pucolanowej popiołów po długotrwałym przebywaniu w warunkach atmosferycznych nie są dotąd ogólnie dostępne. W użytych w badaniach popiołach oznaczone wskaźniki aktywności pucolanowej wyniosły odpowiednio po 28 dniach - 71,4%, a po 90 dniach - 83,7%. Były więc nieco niższe od wymaganych w normie PN-EN 450-1:2012 [9] (75 i 85%). Aktywność pucolanowa prób z użyciem piasku naturalnego 0÷2, który wykorzystano w badaniach, wyniosła odpowiednio: po 28 dniach - 70,5%, a po 90 dniach - 81,7%. Była więc niższa od aktywności pucolanowej prób wykonanych z piasku normowego. W analogicznych badaniach przeprowadzonych na popiołach z hałdy BOT Elektrownia Opole uzyskano znacznie wyższe wartości aktywności pucolanowej popiołów składowanych około 8 lat - w granicach 76,2÷80% po 28 dniach i 91,6÷100% dla prób 90-dniowych [13].

Na aktywność pucolanową istotny wpływ ma uziarnienie krzemionkowych popiołów lotnych – zwiększenie wielkości ziaren zmniejsza aktywność pucolanową. Frakcje mniejsze niż 45 μm charakteryzują się dużą aktywnością pucolanową [14, 15]. W popiołach stosowanych w niniejszych badaniach frakcji do 63 μm było tylko około 30%, a frakcji do 125 μm około 50%. Do aktywacji drobnoziarnistych mieszanek z popiołami dodawany był wodorotlenek wapnia w ilości 6% masy popiołu. Wcześniejsze badania prowadzono z jeszcze niższą ilością cementu (90 g cementu na zarób) oraz z dodatkiem wodorotlenku wapnia w ilości 4 i 6% masy popiołu. Korzystniejszy okazał się 6% dodatek wapna [16].

Zgodnie z zaleceniami normy PN-EN 450-1:2012 [8, 9] popiołu użytego w niniejszych badaniach nie można stosować do produkcji betonu, ale może on zostać użyty do innych celów [17-19]. Popioły z wieloletnich hałd, z uwagi na technologie stosowane w trakcie ich wytwarzania spalania, zawierają często ponad 10% niespalonego węgla.

Uzyskano wytrzymałości na ściskanie serii prób mieszanek 28-dniowych od 7,41 do 8,92 MPa, a prób 90 dniowych od 9,65 do 13,95 MPa. Wytrzymałości na ściskanie prób kontrolnych bez popiołu o tym samym wieku wyniosły tylko 1,7 i 2,3 MPa (tabela 2). Obliczone zmiany wytrzymałości na ściskanie związanych mieszanek z popiołami w stosunku do wytrzymałości serii kontrolnej przedstawiono na rysunku 3.

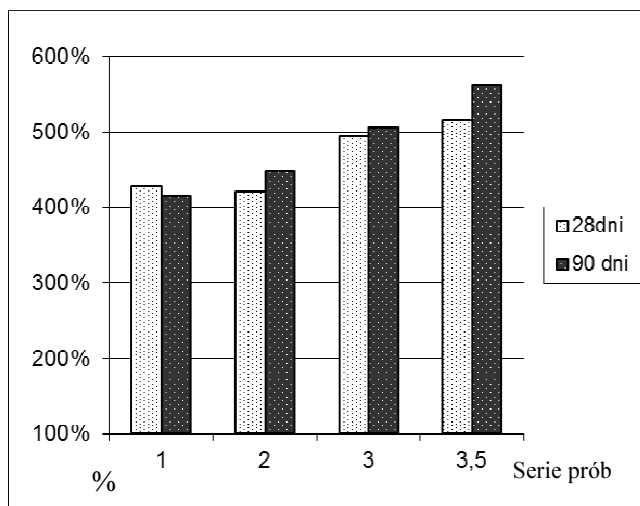
Wytrzymałości na zginanie serii prób 28-dniowych wyniosły odpowiednio od 1,05 do 2,02 MPa. Serie prób 90-dniowych uzyskały wytrzymałości od 2,34 do 3,23 MPa. Dla porównania próby kontrolne bez popiołu o tym samym wieku osiągnęły wytrzymałości tylko 0,16 i 0,21 MPa. Obliczone zmiany wytrzymałości na zginanie związanych mieszanek z popiołami w stosunku do wytrzymałości serii kontrolnej przedstawiono na rysunku 4.

W wyniku przeprowadzonych badań uzyskano zdecydowanie wyższe wytrzymałości na ściskanie i zginanie stwardniałych mieszanek z popiołami w porównaniu z wytrzymałością serii kontrolnej bez popiołów. Wzrosty wytrzymałości na ściskanie serii prób z dodatkiem popiołów i wapna w stosunku do serii kontrolnej bez popiołu wyniosły od ponad 400 do ponad 500% i były zbliżone w próbach 28- i 90-dniowych. Wzrost wytrzymałości na zginanie prób 28-dniowych z popiołami (serie „1”, „2”, „3” oraz „3,5”) w stosunku do wytrzymałości serii „0” wyniósł ponad 600 do 1200%, a w próbach 90-dniowych był jeszcze wyższy.

Zawartość cementu w zaprawie kontrolnej i w seriach prób z popiołami była niska i wynosiła tylko 7,69% suchej masy składników. Gęstości kompozytów z popiołami były od kilku do 15% niższe aniżeli próby kontrolne. Nasiąkliwość prób z 10% zamianą piasku na popiół była zbliżona do nasiąkliwości serii kontrolnej. Serie z 20, 30 i 35% zamianą piasku na popiół uzyskały wyższe nasiąkliwości – od 13,9 do 17,5% (tab. 2).

Na podstawie własnych badań oraz badań popiołów z hałdy Elektrowni Opole można stwierdzić, że procesy fizykochemiczne zachodzące w popiołach na hałdzie pod wpływem czynników atmosferycznych nie muszą stanowić przeszkody w dalszym ich wykorzystaniu, np. w drogownictwie [13, 16]. Uzyskane wyniki badań

właściwości kompozytów z popiołami sugerują możliwość zastosowania tych popiołów w drogownictwie po określeniu ich trwałości w mediach korozyjnych, na które mogą być narażone.



Rys. 3. Zmiany wytrzymałości na ściskanie prób 28- i 90-dniowych stwardniałych mieszanek z popiołami w stosunku do próby bez popiołu

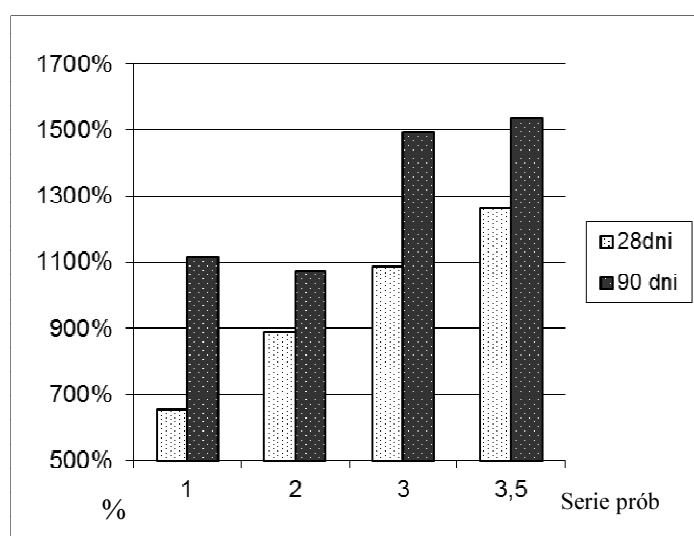
Fig. 3. The changes of the compressive strength of the 28-day and 90-day samples of the hardened mixtures with fly ashes as compared to the samples devoid of ashes

Źródło: opracowanie własne

Podsumowanie

Konstytucyjna i cywilizacyjna konieczność ochrony środowiska i jego zasobów może przejawiać się m.in. w potraktowaniu odpadów przemysłowych jako surowca. Wykorzystanie popiołów ze starych hałd jako składnika mieszanek z popiołami wpisuje się w jedno z założeń strategii zrównoważonego rozwoju, akcentujących potrzebę oszczędzania nieodnawialnych zasobów mineralnych. Może mieć również wymiar praktyczny, zwłaszcza w tych rejonach Polski, w których nieodnawialne surowce mineralne stają się coraz trudniej dostępne.

Zastosowane w badaniach popioły z wieloletniej hałdy ze względu na uziarnienie i zawartość niespalonego węgla nie mają według PN-EN 450-1:2012 [9] wymaganych właściwości do produkcji cementu i betonu.



Rys. 4. Zmiany wytrzymałości na zginanie serii prób 28- i 90-dniowych stwardniałych mieszanek z popiołami w stosunku do próby bez popiołu

Fig. 4. The changes of the flexural strength of the 28-day and 90-day samples of the hardened mixtures with fly ashes as compared to the samples devoid of ashes

Źródło: opracowanie własne

Pomimo ograniczonej ilości cementu (7,7% suchej masy) próby 28-dniowe drobnoziarnistych mieszanek z popiołami z wieloletniej hałdy uzyskały wytrzymałości na ściskanie od 7,4 do 8,9 MPa, a próby 90-dniowe odpowiednio - od 9,6 do 13,9 MPa. Uzyskane wyniki sugerują możliwość zastosowania tych mieszanek w budownictwie drogowym, np. do budowy nasypów drogowych, ich uszlachetniania i stabilizacji oraz do wykonywania podbudów drogowych [19, 20].

Literatura

- [1] Kabziński A., Jest źle, ale zawsze może być gorzej. Surowce i Maszyny Budowlane 2013, 3, 14-17.
- [2] Zając A., Kanafek J., Fałat K., Starnawski G., Czy budowa dróg może być elementem zrównoważonego rozwoju? Materiały XII konferencji nt. Popioły z energetyki, Sopot 2005, 251-261.
- [3] Giergiczny Z., Rola popiołów lotnych wapniowych i krzemionkowych w kształtowaniu własności spoiw budowlanych i tworzyw cementowych, Monografia 325, Politechnika Krakowska, Kraków 2008.
- [4] Bouzoubaa N., Fournier B., Optimization of fly ash content in concrete, Cement and Concrete Research 2003, 33, 1029-1037.
- [5] Oner A., Akyuz S., Yildiz R., An experimental study on strength development of concrete containing fly ash and optimum usage of fly ash in concrete, Cement and Concrete Research 2005, 35, 1165-1171.
- [6] Kruger R.A., Technologie przyszłości - perspektywy i przykłady, Materiały XII konferencji nt. Popioły z energetyki, Sopot 2005, 9-16.

- [7] Gawlicki M., Małolepszy J., Wykorzystanie odpadów przemysłowych w drogownictwie - zagrożenia, Materiały XXVI Konferencji Naukowo-Technicznej nt. Awarie budowlane 2013, 23-38.
- [8] PN-EN 14227-3:2007 – Mieszanki związane spoiwem hydraulicznym - Specyfikacja - Część 3: Mieszanki na popiołach lotnych.
- [9] PN-EN 450-1:2012, Popiół lotny do betonu - Część 1: Definicje, specyfikacje i kryteria zgodności.
- [10] Neville A.M., Właściwości betonu, Wydawnictwo Polski Cement, Kraków 2012.
- [11] PN-EN 196-1:2006, Metody badania cementu - Część 1: Oznaczanie wytrzymałości.
- [12] Kurdowski W., Chemia cementu i betonu, Wydawnictwo Naukowe PWN, Kraków 2010.
- [13] Swiło K., Aktywność popiołu po długookresowym przechowywaniu w warunkach atmosferycznych i wybrane zagadnienia gospodarki popiołem na przykładzie BOT Elektrownia Opole S.A., Materiały XIV konferencji nt. Popioły z energetyki, Międzyzdroje 2007, 143-150.
- [14] Małolepszy J., Tkaczewska E., Wpływ uziarnienia krzemionkowych popiołów lotnych na proces hydratacji i właściwości cementu, Cement Wapno Beton 2007, 296-302.
- [15] Bentz D.P., Hansen A.S., Guynn J.M., Optimization of cement and fly ash particle size to produce sustainable concretes, Cement and Concrete Composites 2011, 33, 824-831.
- [16] Rudziński A., Analyse of the durability of ash-cement composites with fly ashes from the heap Michelin Poland SA subjected to corrosion, Technical Sciences 2014, 17(4), 361-370.
- [17] Vale J., Feuerbon H.J., ECOBA EN-450-2 kontrola popiołu lotnego do betonu, jakość produkcji w elektrowniach, Materiały XII konferencji nt. Popioły z energetyki, Sopot 2005, 63-71.
- [18] Krlickova E., Możliwość wykorzystania materiałów odpadowych do budowy dróg, CWB 1994, 6, 184-187.
- [19] Sybilski D., Ocena i badania wybranych odpadów przemysłowych do wykorzystania w konstrukcjach drogowych, Instytut Badawczy Dróg i Mostów, Warszawa 2003.
- [20] Rafalski L., Drogi i mosty. Poradnik praktyka, Tom 3, Verlag Dashofer Sp. z o.o., Warszawa 2003.

Research on the Possibility of Using Fly Ashes from a Many Years' Stockpile in Fine-grained Mixtures Used in Road Construction

The aim of this study was an examination of the possibility of using ashes from a many years' stockpile as a component of fine-grained mixtures used in a road construction. Thanks to the research done, ashes (combustion by-product) may not longer be considered as a troublesome industrial waste material degrading the environment, but they can become a desirable raw material in road-building, mainly in making road embankments, in their improvement and stabilization and making road foundations. In the research, 4 series of samples were prepared, in which ashes from a stockpile replaced 10, 20, 30 and 35% of sand mass. The mixtures with ashes were modified by an addition of hydrated lime in the amount of 6% of ashes mass. The control series was without ashes and lime. The mass of cement in the dry mixtures was small and stood at 7.7%. The principal technical properties of the 28- and 90-day mixture samples were examined. The composites with ashes, in comparison to these devoid of them, gained the rise of compressive strength of over 400%, and that of ultimate tensile strength while bending of over 600%. The results of the research indicate the possibility of using ashes from a many years' stockpile for modification of mixtures used in road construction. It will limit the onerousness of these materials for the environment to a great degree.

Keywords: fly ash (combustion by-product), stockpile, fine-grained mixture with fly ashes, hydrated lime