

Piotr SZADKOWSKI*
Politechnika Wroclawska

AKTYWNY POPIÓŁ LOTNY A WZMOCNIENIE PODTORZA

Streszczenie. Artykuł jest przeglądem najważniejszych zagadnień, jakie towarzyszą wzmocnieniu podtorza kolejowego aktywnymi popiołami lotnymi. Przedstawiono popioły lotne, ich powstawanie i rodzaje oraz budowę podtorza kolejowego wraz ze sposobami jego wzmocniania.

AKTIV FLY ASH AND TRACKBED REINFORCEMENT

Summary. Article is a review of the most important questions concerning railway trackbed reinforcement with active fly ashes. Formation of fly ashes, their types as well as railway trackbed structure alongside with reinforcement methods was introduced.

1. Popiół lotny

Popiół lotny jest ubocznym produktem spalania paliw otrzymywanym w elektrowniach i elektrociepłowniach. Rozporządzenie Ministra Środowiska [1] określa popiół lotny mianem odpadu nie będącego odpadem niebezpiecznym. Oznacza to, że może on być składowany przy spełnieniu pewnych warunków określonych w Ustawie Prawo Ochrony Środowiska [2]. Powinien on być w miarę możliwości zagospodarowywany. Zastosowanie popiołu lotnego w przemyśle zmniejszyłoby rozmiary niebezpiecznych bomb ekologicznych, jakimi są składowiska żużli i popiołów lotnych. Ustawodawstwo europejskie, które będzie za kilka lat obowiązywać także w Polsce, nakłada na wytwórców odpadu, jakim między innymi jest popiół lotny, obowiązek zagospodarowywania określonej części popiołu w przemyśle budowlanym. W przeciwnym razie są oni zmuszeni do uiszczania wielokrotnionych opłat za korzystanie ze środowiska naturalnego.

*Opiekun naukowy: Dr hab. inż. Marek Krużyński, prof. nadzw. Politechniki Wrocławskiej

Najprostszą i najogólniejszą klasyfikację popiołów lotnych znajdujemy w normie: drogi samochodowe, popioły lotne [3]. W zależności od rodzaju spalanego węgla wyróżnia się dwa rodzaje popiołów lotnych, a mianowicie popioły lotne z węgla kamiennego (PK) oraz popioły lotne z węgla brunatnego (PB).

Natomiast w zależności od zastosowania wyróżnia się :

- odmianę a – stosowaną jako dodatek hydrauliczny do innych materiałów wiążących,
- odmianę b – stosowaną do ulepszania składu granulometrycznego gruntów sypkich,
- odmianę c – stosowaną jako samodzielny materiał wiążący do stabilizacji gruntów spoistych oraz do zmiany odczynu gruntów.

Z punktu widzenia przydatności popiołów lotnych do wzmacniania podtorza możemy wyróżnić ich trzy rodzaje. Popioły lotne z węgla kamiennego jako nieaktywne PKb oraz z brunatnego PBb i Pbc. Pierwszy jako nieaktywny nie będzie tematem niniejszego artykułu. Klasyfikacja przedstawiona w normie [3] nie uwzględnia zastosowania odmiany PBb jako samodzielnego materiału wiążącego grunty niespoiste (zwłaszcza materiał kamienny), co zostało uwzględnione w normie [4]. Z reguły popioły lotne z węgla brunatnego postrzegamy jako aktywne lub bardzo aktywne, dlatego też nie mogą być one traktowane wyłącznie jako dodatek doziarniający w stabilizacji mechanicznej.

1.1. Aktywność popiołu lotnego

Aktywność popiołów lotnych określa się za pomocą zawartości w popiele wolnego tlenu wapnia CaO. Zawartość ta zależy przede wszystkim od rodzaju i pochodzenia spalanego węgla oraz od sposobu wychwytywania popiołów lotnych ze spalin. W bezrusztowej metodzie spalania węgla (uprzednio zmielonego) dodaje się do niego wapno. Ma ono za zadanie zareagować ze związkami siarki. Następnie całość jest wytrącana mechanicznie lub elektrostatycznie ze strumieni spalin w postaci popiołu lotnego. Norma [3] określa przedziały aktywności popiołów lotnych przedstawione w tabeli 1.

Tabela 1

Wielkość aktywności	Zawartość wolnego CaO
nieaktywne lub bardzo mało aktywne	mniej niż 3,5%
mało aktywne	co najmniej 3,5%, lecz nie mniej niż 7%
aktywne	co najmniej 7%, lecz nie mniej niż 14%
bardzo aktywne	co najmniej 14%

W Polsce popioły lotne z węgla brunatnego dzieli się pod względem miejsca powstawania na popioły okręgu turoszowskiego, bełchatowskiego oraz konińskiego. W zależności od rodzaju kotła oraz sposobu wytrącania siarki zawartość wolnego CaO w popiołach lotnych może znaczenie się różnić. W Elektrowni Turów popioły lotne z kotłów fluidalnych mają zawartość CaO od 12 do 18%, gdy popioły z kotłów pyłowych jedynie 1-4%.

Pozostaje jeszcze wskaźnik aktywności puculanowej, który norma „Popiół lotny do betonu” [5] określa jako stosunek procentowy wytrzymałości na ściskanie beleczek wykonanych z mieszaniny złożonej w 75% z cementu i w 25% z popiołu lotnego do wytrzymałości na ściskanie beleczek wykonanych w 100% z popiołu lotnego.

Przeprowadzone badania na próbkach popiołu lotnego fluidalnego z Elektrowni Turów wykazały wysoką aktywność puculanową. Przykładowo próbka $h=\varnothing=5\text{cm}$ wykonana z tego popiołu wykazała nośność po 3 dniach $R_3^1=2,5\text{ MPa}$, natomiast po 17 dniach moczenia w wodzie $R_{17}^{20}=7,0\text{ MPa}$! Próbki te wykonano przy wilgotności 31,5%. Wskaźnik nasiąkliwości popiołu lotnego wyniósł 34,2 do 36,8%. Można z tego wnioskować, że w warunkach naturalnych przy wychwytywaniu wilgotności z powietrza mieszanki popiołowo-gruntowe mogą znacznie zwiększać swoją wytrzymałość wraz z upływem czasu.

1.2. Asortyment aktywnych popiołów lotnych

Jak już wspomniano wyżej, różnorodność popiołów lotnych ze względu na wiele czynników jest bardzo duża. Generalnie jednak można ująć asortyment tego materiału w zasadnicze grupy, odpowiadające miejscu pobierania materiału do dalszego wykorzystania. Przykładowo w Elektrowni Turów można wyróżnić cztery podstawowe grupy popiołów lotnych:

- popiół lotny fluidalny, pochodzący z kotłów fluidalnych, w których spalanie odbywa się w cyrkulacyjnym złożu fluidalnym w temperaturze 850-900°C, która to jest optymalna do suchego odsiarczania spalin przy użyciu kamienia wapiennego,
- popiół lotny z kotłów pyłowych, do których węgiel wraz z kamieniem wapiennym jest wdmuchiwany w postaci pyłu (są one obecnie wycofywane z eksploatacji na rzecz nowocześniejszych i ekologicznych kotłów fluidalnych),
- popiół lotny fluidalny poddany aktywizacji mechanicznej metodą EMDC, tzw. flubet, służący jako pełnowartościowy dodatek do betonów i mieszanek betonowych,
- popiół lotny z denny pozyskiwany z dna komory spalania.

Pod względem możliwości wykorzystania popiołów lotnych w kolejnictwie najbardziej interesującym materiałem jest popiół z kotłów fluidalnych. Popiół z kotłów pyłowych będzie ma-

teriałem coraz bardziej deficytowym ze względu na wycofywanie tego typu kotłów. Natomiast flubet jest materiałem droгим, wykorzystywanym w całości do produkcji betonów.

1.3. Ekonomia stosowania popiołów lotnych w budownictwie kolejowym

Popioły lotne mogą poważnie obniżyć koszty modernizacji podtorzy kolejowych, zastępując w części bądź w całości cement używany do wzmacniania warstw podtorza. Poniżej w tabeli 2 przedstawiono porównanie kosztów zakupu oraz dostarczenia na budowę popiołu lotnego oraz cementu. Założono oddalenie miejsca wbudowania popiołów lotnych od elektrowni na 300 km. Transportu cementu nie uwzględniono, zakładając dostarczenie przez producenta bezpłatnie. Wnioski nasuwają się same.

Tabela 2

Koszt na 1tonę [PLN]	Popiół lotny	Cement
Zakup	10,00	273,00
Transport samochodowy	107,70	0,00
RAZEM	117,70	273,00

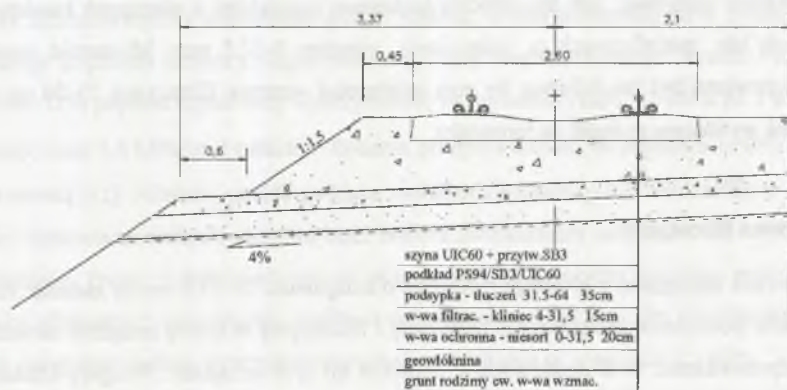
1.4. Ekologia

Dla każdego kto był w pobliżu jednego z trzech zagłębi węgla brunatnego w Polsce, słowa ekologia i utylizacja odpadów nabierają nowego wymiaru. Składowanie dużej ilości popiołów i żużli, która sięga trzech pociągów towarowych na dobę, jest bardzo uciążliwe i kłopotliwe. Kłopotliwe z wielu względów, takich jak zapylenie i degradacja krajobrazu, duże opłaty za składowanie odpadów. Przykładowo, składowisko odpadów oraz nadkładu przy Elektrowni Turów jest już tak duże, że nie mieści się w granicach Państwa Polskiego. Unormowania prawne oraz ulgi podatkowe dla firm wykorzystujących materiały odpadowe pomogą w przyszłości w wykorzystaniu popiołów lotnych w większym niż dzisiaj stopniu.

2. Podtorze i podłoże kolejowe

Podtorze kolejowe norma [6] oraz przepisy zawarte w Dzienniku Ustaw nr 151 [7] definiują jako budowlę geotechniczną wykonaną w gruncie rodzimym w postaci nasypu albo wykopu wraz z urządzeniami ją zabezpieczającymi i odwadniającymi. Generalnie, wspo-

mniane przepisy nie zaliczają podłoża gruntowego do podtorza kolejowego. Stanowi ono jego element dopiero wtedy, gdy zostanie wzmocnione (norma [8]). Do podtorza natomiast można na pewno zaliczyć warstwę ochronną, którą można podzielić na dwie subwarstwy stanowiące pewien kompromis stosowany dla spełnienia wymagań normy [8] i przepisów D4 [9]. Według tych przepisów warstwa ochronna podtorza kolejowego powinna być zbudowana z materiału zarazem wysoko filtrującego, jak i dobrze zagęszczającego się, czyli posiadającego optymalne uziarnienie. Materiałów spełniających jednocześnie obydwa te warunki nie ma, dlatego stosuje się dwie subwarstwy: stricte ochronną i filtracyjną.



Rys. 1. Przekrój poprzeczny

Fig. 1. Cross section

2.1. Podłoże gruntowe

Podłoże gruntowe po odkryciu, wyrównaniu i zagęszczeniu powinno posiadać wystarczająco dużą nośność i odporność na działanie wody i mrozu. Znając rodzaj materiału oraz miąższość projektowanych warstw podtorza, można łatwo wyliczyć wg załącznika do Instrukcji D4 [9] nośność, jaką powinno wykazywać podłoże gruntowe. Dla wzmocnienia podłoża można zastosować następujące rozwiązania:

- wzmocnienie warstwy podłoża, np. poprzez stabilizację materiałami wiążącymi (wapno, cement, popiół lotny),
- pogłębienie projektowanej niwelety robót ziemnych, czyli de facto wymianę słabego gruntu na materiał warstwy ochronnej.

2.2. Warstwa ochronna

Warstwa ta stanowi pierwszą subwarstwę zabudowywaną na podłożu gruntowym. Zabezpiecza ona następne warstwy przed przenikaniem i mieszaniem się z gruntem podłoża kolejowego. Dzięki małej przepuszczalności oraz zastosowaniu dodatkowo geosyntetyków filtracyjnych czy separacyjnych jest doskonałym zabezpieczeniem przed wychłapami materiału podłoża w warstwy nośne podtorza kolejowego. Przy zabrojeniu tej warstwy geosiatką o odpowiednio dobranej wytrzymałości i rozmiarze oczek oraz po zastabilizowaniu jej materiałami wiążącymi, jak cement czy popiół lotny może ona stanowić bardzo mocną podbudowę dla nawierzchni kolejowej. Jest ona obecnie budowana najczęściej z mieszanek kamiennych porfirowych lub melafirowych o uziarnieniu ciągłym 0-31,5 mm. Miąższość warstwy ochronnej powinna być tak dobrana, by przy miąższości warstwy filtracyjnej 15-20 cm była zapewniona wymagana nośność na torowisku.

2.3. Warstwa filtracyjna

Zbudowana najczęściej z kłińca porfirowego o uziarnieniu 16-31,5 ma za zadanie, dzięki zastosowaniu pochylenia styku warstw ochronnej i filtracyjnej w stronę urządzeń odwadniających, odprowadzenie wód opadowych z podtorza do tych urządzeń. Przepisy Dziennika Ustaw nr 151 [7] dopuszczają pochylenie warstw w zakresie 3-5%.

3. Wzmocnienie podtorza

Wzmocnienie podtorza kolejowego można realizować podczas modernizacji istniejących linii kolejowych za pomocą:

- wymiany gruntu podłoża na nośny materiał warstwy ochronnej,
- stabilizacji podłoża gruntowego materiałami wiążącymi (cement, wapno, popioły),
- wzmocnienia warstwy ochronnej poprzez odpowiedni dobór uziarnienia (dodatki doziarniające, np. popiół lotny z węgla kamiennego) tzw. stabilizację mechaniczną,
- zastosowania dodatków wiążących warstwę ochronną, np. popiołów lotnych,
- użycia geotekstyliów w postaci geosiatek i geowłóknin.

Wybór sposobu wzmocnienia podtorza uzależniony jest od takich czynników, jak:

- poziom zwierciadła wody gruntowej,

- rodzaj gruntu, z jakiego zbudowane jest podłoże kolejowe,
- ekonomiczne uzasadnienie wymiany lub stabilizacji podłoża.

3.1. Stabilizacja podłoża gruntowego aktywnymi popiołami lotnymi

Gliny, pyły i piaski gliniaste, czyli grunty spoiste i mało spoiste wg [10], to dobry materiał do stabilizacji popiołami lotnymi z węgla brunatnego. Ilość popiołów lotnych dodawanych do gruntów powinna zawierać się między 8 a 12% w stosunku do suchej masy gruntu.

Przeprowadzone przez autora niniejszego artykułu badania wytrzymałości na ściskanie próbek uformowanych z nienośnego gruntu podłoża, w tym przypadku gliny pylastej, stabilizowanego popiołem lotnym z węgla brunatnego dały bardzo obiecujące wyniki. Próbki z dodatkiem 12% popiołu uzyskiwały wytrzymałość na ściskanie rzędu 1,5 MPa po 3 dniach pielęgnacji, oraz 2,4 MPa po 14 dniach. Badania przeprowadzono na próbkach $h=\varnothing=5$ cm zgodnie z normą [11]. Niestety, próbki poddane nasiąkaniu rozpadały się. Należałoby w tym przypadku zastosować dodatek cementu bądź bitumu zwiększający odporność na zawilgocenie i zamrażanie. Próby przeprowadzone na mieszankach przy użyciu gruntów mało spoistych (piasku gliniastego) dały wyniki zgodne z założeniami normy [12]. Po 14 dniach nasiąkania wodą osiągnięto średnią wytrzymałość próbek na ściskanie w granicach 1,5 MPa.

Popioły lotne nadają się do stabilizacji podłoża gruntowego. Wymaga to jednak prowadzenia w trakcie trwania budowy badań laboratoryjnych na bieżąco i ciągłego uaktualniania receptury mieszanki popiołowo-gruntowej. Przy dużym zróżnicowaniu gruntów podłoża może sprawiać to spore problemy natury technicznej i ekonomicznej. Użycie popiołów lotnych jest na pewno w pełni uzasadnione w przypadku potrzeby chwilowego wzmocnienia podłoża gruntowego w celach technologicznych. W przypadku dużej wilgotności gruntu można osuszyć go wprowadzając odpowiedni dodatek popiołów lotnych. Szerzej zagadnienie to omówiono w artykule [13].

3.2. Stabilizacja warstwy ochronnej

Ze względu na większą jednorodność materiału warstwy ochronnej masowe zastosowanie popiołów lotnych do jej wzmocnienia ma o wiele większe szanse niż w przypadku podłoża gruntowego. W przypadku tym można przenieść na grunt kolejowy większość zapisów wspomnianej już drogowej normy „Podbudowa z betonu popiołowego” [4]. Warstwa ochronna wzmocniona przykładowo 12% dodatkiem popiołu lotnego oraz 3% dodatkiem

emulsji bitumicznej przy optymalnej wilgotności określonej dla mieszanki może okazać się bardzo nośnym i mrozoodpornym materiałem. Moduł odkształcenia takiego materiału może osiągnąć nawet 300 MPa, gdzie dla samego niesortu moduł wynosi 200 MPa.

Zastosowanie takiej stabilizacji podłoża pozwoli w krótkim czasie na uzyskanie zadowalających parametrów (przede wszystkim nośności) podtorza. Przykładowo, problemy z zagęszczeniem warstwy ochronnej zabudowywanej maszyną AHM-800 R, opisane w publikacjach [14] i [15], mogłyby tą drogą zostać rozwiązane. Wymaga to jednak szeregu prac badawczych i doświadczeń polowych. Zbadać należy m.in. wpływ czasu składowania gotowych mieszank na ich właściwości wytrzymałościowe.

3.3. Metody stabilizacji

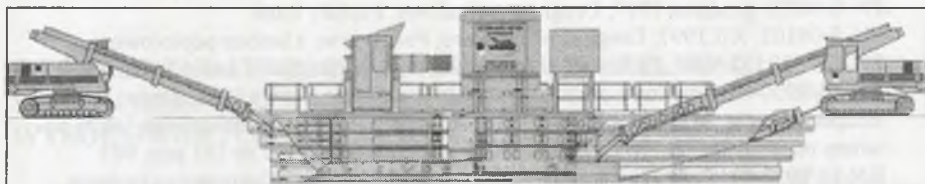
Zarówno podłoże gruntowe, jak i warstwy podtorza kolejowego można wzmacniać przy użyciu zespołu maszyn, którego głównym elementem jest tak zwany recykler. Jest to profesjonalna maszyna do stabilizacji podłoża przy użyciu materiałów wiążących. Zespół taki przedstawiony jest na rysunku 2. Stosowanie tej technologii ze względu na wysoki koszt jest opłacalne przy stabilizowaniu powierzchni ponad 10 tys. m². Biorąc pod uwagę użycie taniego materiału wiążącego, jakim jest popiół lotny, stosowanie tej technologii na kolei może okazać się ekonomicznie uzasadnione.



Rys. 2. Kolejność wykonywania prac przy stabilizacji podtorza z zastosowaniem recyklera
Fig. 2. Work order of trackbed stabilization with use of a recycler machine

Stabilizacja materiałami wiążącymi podłoża gruntowego może odbywać się także za pomocą maszyny WARAN. Służy ona do głębokiego ulepszenia słabonośnego podłoża gruntowego. Za pomocą kroczących szalunków ulepszenie podłoża kolejowego jest możliwe do głębokości 3 m poniżej niwelety torowiska i to przy prowadzeniu ruchu po torze sąsiednim [16]. Maszyna ta pracowała w Polsce przy modernizacji linii kolejowej Kraków Płaszów – Oświęcim w roku 2000. Po dodaniu do gruntu wapna w ilości 7-8% wtórny moduł odkształcenia mierzony na gruncie wzrósł z ok. 10-20 MPa od ok. 50 do 400 MPa [17]. Niestety, jest to metoda droga. Koszt ulepszenia 1m³ na wyżej wspomnianym odcinku wyniósł około 280 zł [13]. Jest ona co

prawda tańsza od wykonania wymiany gruntu podtorza metodą tradycyjną, ale stosowanie jej do stabilizowania ilości mniejszych od 5000 m³ gruntu jest nieekonomiczne. Możliwość zastosowania popiołów lotnych przy tej technologii [17] daje szansę znacznego zmniejszenia kosztów.



Rys. 3. Widok maszyny WARAN wraz z koparkami
Fig. 3. View of WARAN machine with excavators

Stabilizowanie gruntów metodami tradycyjnymi, czyli z użyciem maszyn rolniczych (przy dość nieprecyzyjnym dodawaniu wody!), może być stosowane wyłącznie dla warstw o grubości do 15 cm i to przy wykorzystaniu sposobów opisanych szerzej w publikacji [13]. Metodą tą można raczej osuszyć podłoże (także przy użyciu popiołów lotnych), niż je zastabilizować.

Bardzo duże zastosowanie przy stabilizacji warstwy ochronnej popiołami lotnymi może mieć maszyna do ciągłej wymiany podtorza AHM-800 R. Mieszanie odbywałoby się na zapleczu logistycznym, gdzie i tak materiał kamienny jest mieszany przy wyładunku i załadunku. Woda dodawana na placu będzie inicjować wiązanie materiału, natomiast woda użyta podczas zabudowywania materiału zagwarantuje odpowiednie zagęszczenie.

4. Podsumowanie

Popioły lotne, a w szczególności te o dużej aktywności, nadają się do wzmocniania zarówno podłoża gruntowego, jak i podtorza kolejowego. Specyfika obciążeń, jakie są przekazywane przez tabor na nawierzchnię, a następnie na podtorze kolejowe, powoduje, że nie można tutaj skorzystać z doświadczeń budownictwa drogowego. Konieczne jest przeprowadzenie cyklu badań laboratoryjnych oraz terenowych w celu unormowania stosowania popiołów lotnych w kolejnictwie. Zastosowanie stabilizacji warstwy ochronnej popiołami lotnymi w technologii ciągłej wymiany podtorza maszyną AHM-800 R daje możliwość wykorzystania tego materiału odpadowego na szeroką skalę. Pozwoli to przy minimalnych nakładach na poprawienie parametrów podtorza, takich jak nośność czy stopień zagęszczenia, a co za tym idzie wydłużenia okresu czasu między naprawami głównymi linii kolejowych.

LITERATURA

1. Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 27.09.2001r. w sprawie katalogu odpadów DzU nr 112, poz. 1206.
2. Ustawa z 27.04.2001r. Prawo ochrony środowiska DzU z 2001r. nr 62, poz. 627.
3. PN-S-96035 grudzień 1997; Drogi samochodowe; Popioły lotne.
4. PN-S-06103; XII.1997; Drogi samochodowe; Podbudowa z betonu popiołowego.
5. PN-EN 450; XI.1998; Popiół lotny do betonu; Def., wymagania i kontrola jakości.
6. BN-88/8930-03; Gruntowe podtorze i podłoże kolejowe; Nazwy i określenia.
7. Rozporządzenia MTiGM z 10.09.1998 w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budowle kolejowe i ich usytuowanie – DzU nr 151 poz. 987
8. BN-88/8932-02; Podtorze i podłoże kolejowe; Rob. ziemne. Wymagania i badania.
9. Dyrekcja Generalna PKP: D4 Instrukcja o utrzymaniu podtorza kolejowego; Załącznik do Zarządzenia nr 76 Zarządu PKP z 04.11.96r. (ze zmianami podanymi w zarządzeniu nr 122 Zarządu PKP z 29.08.2000 r.).
10. Wiłun Z.: Zarys geotechniki, wyd.3; Warszawa 1987.
11. PN-S-96011; I.1998; Drogi samochodowe; Stabilizacja gruntów wapnem do celów drogowych.
12. BN-71/8933-10; Drogi samochodowe; Podbudowa z gruntów stabilizowanych aktywnymi popiołami lotnymi.
13. Szadkowski P.: Możliwości zastosowania stabilizacji i powierzchniowego ulepszenia we wzmocnieniu torowiska kolejowego w odniesieniu obecnych robót modernizacyjnych prowadzonych na liniach magistralnych, IX Konferencja Naukowo-Tech. "Drogi Kolejowe 01", Wrocław - Żmigród XI.2001; s. 263-273.
14. Krużyński M., Piotrowski A.: Badania nośności warstw ochronnych zabudowanych maszyną AHM800 R, Materiały IX Konferencji Naukowo-Technicznej "Drogi Kolejowe 01", Wrocław - Żmigród 2001; s. 125-130.
15. Krużyński M., Piotrowski A.: Badania zagęszczenia warstw ochronnych zabudowanych maszyną AHM800 R, Materiały IX Konferencji Naukowo-Technicznej "Drogi Kolejowe 01", Wrocław - Żmigród 2001; s. 131-136.
16. "Dokumentation der Konzeptionierung, Entwicklung, Erprobung und Einsatz des Wanderrden Verbau WARAN" – Creilsheim 1999.
17. Obuchowicz B.: Badania i obserwacje wzmocnienia gruntu podtorza przez wapnowanie przy użyciu maszyny WARAN, Materiały IX Konferencji Naukowo-Technicznej "Drogi Kolejowe 01", Wrocław - Żmigród 2001; s. 161-169.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Krystyna Skarzyńska

Abstract

Article is a review of the most important questions concerning railway trackbed reinforcement with active fly ashes. Formation of fly ashes, their types as well as railway trackbed structure alongside with reinforcement methods was introduced.